



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA POVLAKOVANÝCH VBD ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ

ANALYSIS OF THE COATED CARBIDE CUTTING INSERTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Radim ZDRÁHALA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zdeněk FIALA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radim Zdráhala

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza povlakovaných VBD ze slinutých karbidů

v anglickém jazyce:

Analysis of the coated carbide cutting inserts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede literární rešerši na dané téma a uvede souhrn dostupných řezných nástrojů ze SK pro technologii frézování. V rámci řešení BP bude provedeno testování vybraných řezných nástrojů z hlediska silového zatížení a měrných řezných sil působících na nástroj.

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod
2. Aktuální literární studie
3. Teoretický rozbor technologie frézování a řezných nástrojů z SK
4. Experimentální měření
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK,L.a kol.. Nauka o materiálu I. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2002. 392 s. ISBN: 80-7204-283-1.
- [2] FOREJT,M.,PÍŠKA,M. Teorie obrábění,tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] HUMÁR,A. Materiály pro řezné nástroje. 1.vyd. Praha: MM publishing, s.r.o.,2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [4] MATTOX,M. Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing. 2.vyd.Albuquerque (USA): APR,2010. 917s. ISBN: 978-0-8155-2037-5.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 17. 11. 2014



VB. [Signature]

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

VB [Signature]

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřená na analýzu řezných a měrných řezných sil při čelním frézování povlakovanými a nepovlakovanými vyměnitelnými břitovými destičkami. V teoretické části se práce věnuje charakteristice frézovacího procesu, povlakování slinutých karbidů a v neposlední řadě i způsoby měření řezných sil. V experimentální části je popsáno provedení experimentu a následné vyhodnocení silového zatížení povlakované a nepovlakované vyměnitelné břitové destičky při změnách řezných podmínek. Na závěr je provedeno srovnání povlakované a nepovlakované VBD z hlediska opotřebení a silového zatížení.

Klíčová slova

Frézování, vyměnitelná břitová destička, slinuté karbidy, povlakování, silové zatížení

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on the analysis of the cutting and specific cutting forces during face milling of coated and uncoated exchangeable cutting inserts (VBD). The theoretical part deals with the characteristic of the milling process, coating of cemented carbides and last but not least deals with methods for measuring cutting forces. The experiment is described in the experimental part that also includes evaluation of load forces coated and uncoated exchangeable cutting inserts during changes in cutting conditions. Finally is performed the comparison of values coated and uncoated VBD for flank wears and load cells.

Key words

Milling, cutting insert, cemented carbides, coating, force load

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZDRÁHALA, Radim. *Analýza povlakovaných VBD ze slinutých karbidů*. Brno 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 55 s. 8 příloh. Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza povlakovaných VBD ze slinutých karbidů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Radim Zdráhala

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Zdeňku Fialovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a také Milanu Rusiňákovi za pomoc při realizaci experimentu.

Velké poděkování také patří mé rodině a přítelkyni za psychickou podporu v průběhu mého studia a hlavně při vypracovávání této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 FRÉZOVÁNÍ.....	10
1.1 Řezný proces při frézování	10
1.1.1 Sousledné frézování	10
1.1.2 Nesousledné frézování	11
1.2 Řezné podmínky	12
1.3 Řezné síly.....	13
1.3.1 Měrné řezné síly.....	14
1.3.2 Výpočet řezných sil	15
2 POVLAKOVÁNÍ SLINUTÝCH KARBIDŮ	18
2.1 Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů	18
2.2 Metody povlakování	19
2.3 Typy povlaků	21
2.4 Povlaky od firmy SHM, s.r.o.	22
3 METODY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL	24
3.1 Mechanismus vzniku síly řezání	24
3.2 Typy dynamometrů.....	24
3.3 Elektrické dynamometry	25
3.3.1 Piezoelektrické dynamometry.....	25
3.4 Mechanické dynamometry.....	26
4 NÁVRH TESTOVÁNÍ VBD	27
4.1 Obráběcí stroj.....	27
4.2 Obráběný materiál.....	28
4.3 Obráběcí nástroj	28
4.4 Volba vyměnitelné břitové destičky	29
4.5 Volba řezných podmínek	30
4.6 Měřicí aparatura pro měření silového zatížení	31
4.7 Průběh testování VBD	32
4.8 Teoretický výpočet řezných sil při čelní frézování.....	32
4.8.1 Výpočet úhlu záběru zubu	32

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	8
---------	------------------	------	---

4.8.2 Teoretický výpočet řezné a měrné řezné síly dle odborné literatury	33
4.8.3 Teoretický výpočet řezné a měrné řezné síly podle metodiky firmy Walter	34
5 ANALÝZA VÝSTUPŮ Z TESTOVÁNÍ	36
5.1 Změna šířky záběru hlavního ostří	37
5.2 Změna posuvu na zub	42
ZÁVĚR	49
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53
SEZNAM PŘÍLOH	55

ÚVOD

Frézování patří mezi základní technologie třískového obrábění, od kterého je vyžadována vysoká produktivita s přesnými výsledky práce. K tomu se využívá rozmanitých typů nástrojů, které jsou vyrobeny z rychlořezných ocelí, slinutého karbidu, řezné keramiky či jiného řezného materiálu. Nicméně nejpoužívanějším materiálem pro výrobu vyměnitelných břitových destiček je slinutý karbid. Slinutý karbid je totiž díky svým vlastnostem velmi všestranný řezný materiál, který je možné použít pro obrábění většiny materiálů používaných ve strojírenství.

V současnosti jsou neustále vyvíjeny nové typy obráběných materiálů, avšak ve většině případů jsou právě tyto nové materiály hůře obrobitelné. Z tohoto důvodu dochází ke zvyšování nároků na řezné materiály a jejich řezné vlastnosti. Přičemž aby uvedeného cíle bylo možné dosáhnout, je potřeba řezné nástroje zefektivnit. Zvýšení efektivity nástrojů lze docílit pomocí nanášení tvrdých otěruvzdorných vrstev neboli povlakování. Povlakování tak představuje nejen velký technický ale i ekonomický přínos, které dodá nástroji výborné mechanické vlastnosti a tak prodlouží životnost nástroje až několikanásobně. Základem je ale zvolit si vhodné řezné podmínky.

Volba řezných podmínek totiž má velký vliv na celkové silové zatížení celé obráběcí soustavy, stroj – nástroj – obrobek. Při obrábění nedochází nejen k mechanickému zatěžování celé soustavy, ale také k tepelnému zatěžování mezi nástrojem a obrobkem. Právě silové zatížení poskytuje cenné informace o řezném procesu, které mohou být využity pro zlepšení konstrukce nástroje, utvářeče třísky či pro zvýšení životnosti a trvanlivosti nástroje. Nejčastěji vyhodnocovanými veličinami při obrábění jsou řezné síly, měrné řezné síly, drsnost povrchu obrobku a opotřebení řezného nástroje. Přičemž cílem této práce je rozbor silového zatížení vyměnitelné břitové destičky při čelním frézování, které má velký vliv na opotřebení nástroje a posléze na kvalitu obrobku.



Obr. 1 Povlakované vyměnitelné břitové destičky od firmy SHM, s.r.o. [32]

1 FRÉZOVÁNÍ

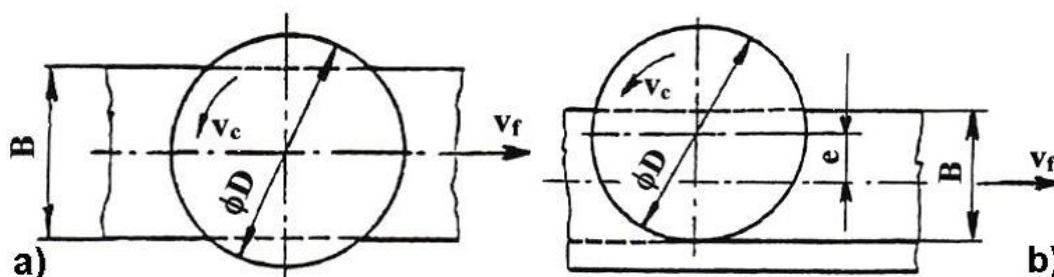
Frézování je jednou z metod třískového obrábění, při které je materiál obrobku odebírán břity otáčejícího se nástroje. Tento proces se uskutečňuje pomocí dvou vzájemných pohybů, kdy se jedná o hlavní řezný pohyb a vedlejší pohyb. Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává jej nástroj (fréza). Obrobek ve většině případů vykonává vedlejší pohyb neboli posuv, obvykle ve směru kolmém k ose nástroje (frézy). Při frézování vznikají krátké třísky, které mají proměnnou tloušťku. Tento typ třísek je způsoben přerušovaným řezným procesem, kdy každý zub frézy odebírá třísku jen po určitý čas při řezném procesu.

1.1 Řezný proces při frézování

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje frézování válcové (frézování obvodem) a frézování čelní (frézování čelem). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby frézování. Jde o frézování okružní a planetové [1, 2].

Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Obrábění je zajištěno břity frézy, které jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje. Hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy [1, 2].

Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, které mají břity vytvořeny na obvodu i čele nástroje. Při čelním frézování rozlišujeme frézování symetrické, kdy osa frézy prochází středem frézované plochy a nesymetrické, kdy osa frézy je vychýlená mimo střed frézované plochy. Oba způsoby čelního frézování jsou vyobrazeny na obr. 1.1 [1, 2].



Obr. 1.1 Čelní frézování: a) symetrické b) nesymetrické [2]

V závislosti na směru posuvu a otáčení frézy rozdělujeme frézování na nesousledné (protisměrné) a sousledné (souměrné).

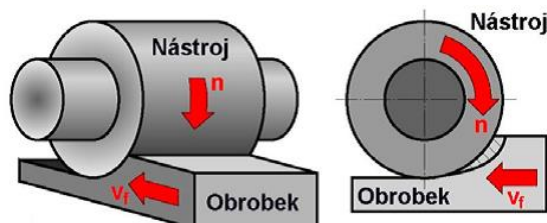
1.1.1 Sousledné frézování

Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku viz obr. 1.2. Maximální tloušťka třísky vzniká na začátku frézování při vnikání zubu frézy do obrobku. Ke konci procesu tloušťka třísky klesá na nulu. Obrobená plocha je vytvořena, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem do stolu frézky. Sousledné frézování má na obráběcí proces specifické nároky v tom smyslu, že obrobek je přitlačován ke stolu frézky. Zároveň řezné síly mají tendenci vtahovat obrobek ve směru posuvu. Z tohoto důvodu může sousledné frézování probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném

případě způsobuje vůle nestejnosměrný posuv a tedy zvětšení tloušťky třísky. Následkem toho může být zničení nástroje [1, 2].

Hlavní výhody sousledného frézování:

- vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- menší potřebný řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, takže lze použít jednodušších upínacích přípravků,
- menší sklon ke chvění,
- obvykle menší sklon k tvoření nárůstku,
- menší drsnost obrobku [1, 2].



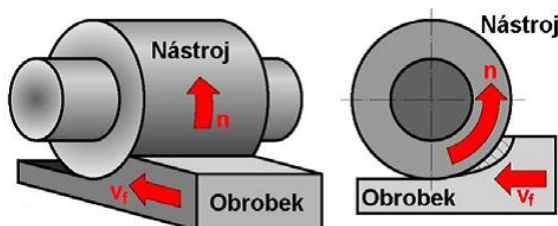
Obr. 1.2 Válcové sousledné frézování [3]

1.1.2 Nesousledné frézování

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku viz obr. 1.3. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty, která je na začátku záběru, až na hodnotu maximální na konci záběru. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Přitom dochází ke vzniku silových účinků a deformací, které způsobují zvýšené opotřebení břitu. Při nesousledném frézování, kdy břit vchází do záběru, se vytváří velké řezné síly. Tyto řezné síly mají za následek vyvolání silného tlaku mezi obrobkem a frézou, což způsobuje, že břit je odtlačován ze záběru. Složka řezné síly působí směrem nahoru a má snahu vytrhávat obrobek z upnutí. Z tohoto důvodu je nutné stabilní a spolehlivé upnutí obrobku na stole frézky [1, 2].

Hlavní výhody nesousledného frézování:

- trvanlivost nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku apod.,
- není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje,
- menší opotřebení šroubu a matice,
- záběr zubů frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu [1, 2].



Obr. 1.3 Válcové nesousledné frézování [3]

1.2 Řezné podmínky

Velmi důležitou roli při obrábění hraje volba vhodných řezných podmínek. Volba řezných podmínek je závislá na druhu prováděné operace (hrubování, dokončování, apod.), typu a vlastnostech stroje i nástroje, materiálu obrobku a především na požadované výsledné jakosti povrchu obrobených ploch (drsnost povrchu, přesnost rozměrů a tvaru obrobku, apod.) [3, 4].

K základním řezným podmínkám patří řezná rychlost v_c , posuv na zub f_z , šířka záběru hlavního ostří a_p a případně také často předepisovaná posuvová rychlost v_f .

Řezná rychlost v_c označuje obvodovou rychlost, jakou opracovává břit obrobek. Jedná se o důležitou veličinu vztahující se k nástroji. Zajišťuje, že obrábění daným nástrojem bude probíhat co nejúčinněji. Řeznou rychlost lze vypočítat dle vztahu (1.1) [3].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

kde: v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost
 D [mm] - průměr nástroje
 n [min⁻¹] - otáčky nástroje

Posuvová rychlost v_f odpovídá relativní rychlosti mezi osou nástroje a obrobkem, neboli odpovídá rychlosti posuvu stolu frézky, na kterém je umístěn obrobek. Výpočet hodnoty posuvové rychlosti lze provést podle vztahu (1.2) [3,4].

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (1.2)$$

kde: v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost
 z [-] - počet břitů nástroje

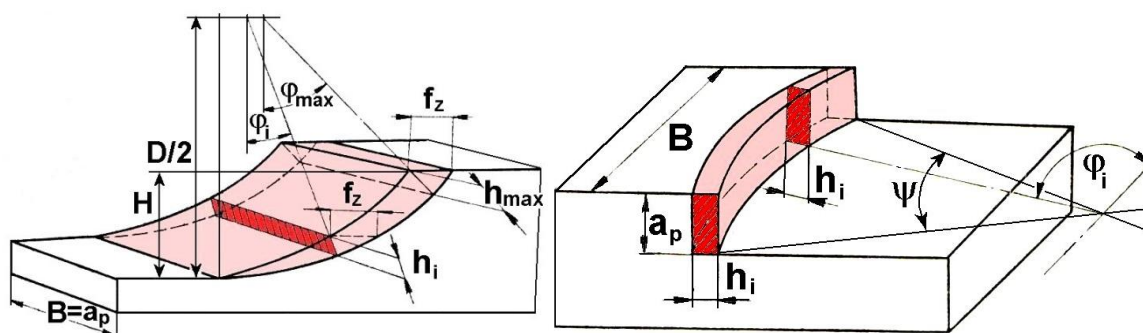
Posuv na zub f_z je při frézování důležitou klíčovou hodnotou. Protože fréza je vícebřítý nástroj, musí existovat hodnota, jejíž pomocí je možné zajistit, že každý břit bude obrábět za nejlepších možných podmínek. Výkon každého jednotlivého zubu (břitu) určuje mez výkonosti nástroje. Posuv na zub odpovídá dráze, kterou urazí fréza v průběhu záběru jednoho zubu. Hodnotu posuvu na zub lze vyjádřit ze vztahu (1.3) [3, 4].

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (1.3)$$

kde: f_z [mm] - posuv na zub

Šířka záběru hlavního ostří a_p je jednou z hodnot, která nám určuje velikost průřezu třísky a tedy i objem odebíraného materiálu. Při čelním rovinném frézování je to axiální hodnota nastavení frézy a při válcovém frézování je to radiální hodnota nastavení frézy. Druhou hodnotou je tloušťka odřezávaného materiálu h_i . Ze známých hodnot šířky záběru hlavního ostří a tloušťky odřezávaného materiálu lze pomocí vztahu (1.4) vypočítat jmenovitý průřez třísky při válcovém frézování. Pro výpočet jmenovitého průřezu třísky

při čelním frézování lze použít vztah (1.5). Jmenovitý průřez třísky při válcovém a čelním frézování je naznačen na obr. 1.4[3, 4].



Obr. 1.4 Průřez třísky při válcovém frézování (vlevo) a čelním frézování (vpravo) [3]

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (1.4)$$

kde: A_{Di} [mm²] - jmenovitý průřez třísky
 a_p [mm] - šířka záběru hlavního ostří
 φ_i [°] - úhel záběru zubu

U čelního frézování je nutné vzít v potaz i úhel nastavení hlavního ostří κ_r [3].

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad (1.5)$$

kde: κ_r [°] - úhel nastavení hlavního ostří

1.3 Řezné síly

Moderní typy frézovacích nástrojů jsou již velmi výkonné, ale i přesto je potřeba vyvinout značné řezné síly na oddělení vrstvy materiálu. Při oddělování vrstvy materiálu během procesu frézování se mění průřez třísky i počet zubů v záběru, z tohoto důvodu je určování výsledných řezných sil mnohem složitější než například u soustružení, kdy je v záběru pouze jeden břit a průřez třísky je konstantní. Výsledný směr a velikost řezné síly nezávisí pouze na průřezu třísky a počtu zubů v záběru, ale i na dalších faktorech. Mezi faktory ovlivňující průběh procesu frézování patří: postup způsobu frézování, poloha nástroje, materiál obrobku, geometrie břitu, tloušťka třísky, velikost a typ opotřebení břitu nástroje a řezné podmínky [4, 5].

Řezné síly vyskytující se v průběhu procesu frézování jsou většinou síly, které vznikají na břitu nástroje při odebrání vrstvy materiálu obrobku. Největší síly vznikají na ostří břitu a směrem od něj se postupně zmenšují. Celková řezná síla F je složena z tangenciální složky řezné síly F_C , normálové složky řezné síly F_{Cn} a axiální složky řezné síly F_p . Tangenciální složka řezné síly, která působí ve směru otáčení nástroje a vykonává práci na odřezání třísky, má největší vliv na výpočet příkonu stroje. Důležité je také silové působení na upínací prvky frézky, na které působí axiální a normálové složky řezné síly. Z tohoto důvodu musí být upínací prvky velmi spolehlivé a stabilní [4, 5].

1.3.1 Měrné řezné síly

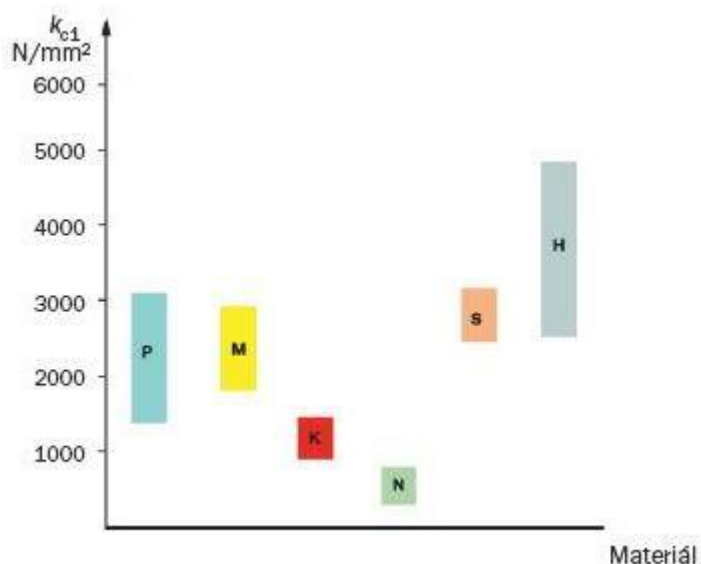
Měrná řezná síla je označována symbolem k_c a hodnotí obrobitelnost určitých materiálů, když je dána konkrétní geometrie břitu nástroje a tloušťka třísky. Jedná se o složku řezné síly, kterou je nutné vyvodit, aby byla odřezána tříska o průřezu 1 mm^2 . Zjednodušený výpočet měrné řezné síly lze provést podle vztahu (1.6) [4, 6]:

$$k_c = \frac{F_c}{A} \quad (1.6)$$

kde: k_c [MPa] - měrná řezná síla
 F_c [N] - složka řezné síly
 A [mm^2] - plocha průřezu třísky

Hodnoty měrných řezných sil mohou být pro určitý materiál nalezeny v tabulkách. Tabulková hodnota se však může měnit, jelikož řezná síla je závislá na úhlu čela, střední tloušťce třísky a řezné rychlosti. Pro tyto parametry řezného procesu byly vypočteny korekční faktory [4, 6].

Poměr mezi řeznou silou a tloušťkou třísky je velmi důležitou hodnotou pro hladký průběh obráběcího procesu. Měrná řezná síla klesá s narůstající tloušťkou třísky. Pokud odebíráme z obrobku velmi malé třísky, bude měrná řezná síla dosahovat vysokých hodnot. Přibližné hodnoty měrných řezných sil pro různé obráběné materiály jsou na obr. 1.4 [4, 6].



Obr. 1.5 Měrné řezné síly k_{c1} pro materiály obráběné VBD s úhlem čela 0° [7]

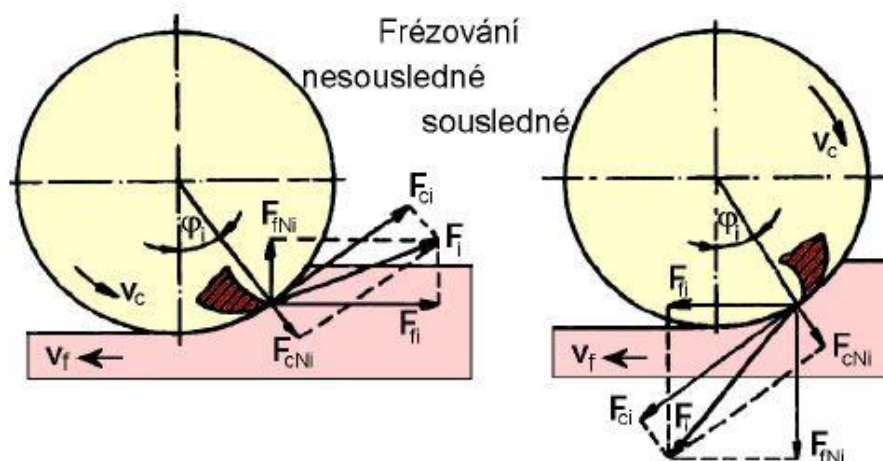
P – oceli (uhlíkové, nízkolegované, vysokolegované), M – korozivzdorné oceli,

K – litiny, N – neželezné kovy na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, plasty, kompozity,

S – slitiny titanu, žárovevné slitiny na bázi niklu, kobaltu nebo železa, H – tvrzené oceli a litiny

1.3.2 Výpočet řezných sil

Při výpočtu řezných sil u frézování jsou uvažovány silové poměry na jednom břitu, který se nachází v poloze určené úhlem φ_i . Při válcovém frézování frézou s přímými zuby se celková řezná síla působící na břit F_i rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , případně na složky F_{fi} a F_{fNi} viz obr. 1.5 [2, 3, 5].



Obr. 1.6 Řezné síly na zubu válcové frézy [3]

F_i – celková řezná síla, F_{ci} – řezná síla, F_{cNi} – kolmá řezná síla,

F_{fi} – posuvová síla, F_{fNi} – kolmá posuvová síla

Řezná síla F_{ci} se určí na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} dle vztahu (1.7) [2]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (1.7)$$

Měrná řezná síla k_{ci} se pro válcové frézování určí dle vztahu (1.8) [2].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (1.8)$$

kde: k_{ci} [MPa] - měrná řezná síla
 C_{Fc} [-] - materiálová konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu
 x [-] - exponent vlivu tloušťky třísky

Dosazením vztahu (1.8) do (1.7) a následnou úpravou bude vztah pro řeznou sílu F_{ci} při válcovém frézování ve tvaru (1.9) [2]:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.9)$$

Analogickým postupem se vyjádří řezná síla F_{ci} pro čelní frézování.

Měrná řezná síla se pro čelní frézování určí dle vztahu (1.10) [2].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (1.10)$$

kde: κ_r [°] - nástrojový úhel nastavení hlavního ostří

Dosazením vztahu (1.10) do (1.7) a následnou úpravou bude vztah pro řeznou sílu F_{ci} při čelním frézování ve tvaru (1.11) [2]:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.11)$$

Symbol C_{Fc} označuje materiálovou konstantu a symbol x označuje materiálový exponent. Hodnoty materiálových konstant C_{Fc} a exponentů x byly empiricky vypočítány a pro frézování válcovou a čelní frézou jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Hodnoty materiálových konstant C_{Fc} a exponentů x pro válcové a čelní frézy [2]

Obráběný materiál	Válcové frézy		Čelní frézy	
	C_{Fc}	x	C_{Fc}	x
Nelegovaná ocel $R_m = 450$ MPa	1200	0,63	1900	0,97
650 MPa	1380	0,72	2030	0,93
850 MPa	1600	0,72	1900	0,94
Chromniklová ocel $R_m = 550$ MPa	1390	0,66	2030	0,90
800 MPa	1440	0,72	2970	0,90
900 MPa	1740	0,74	3160	0,94
Litina HB 180 - 200	850	0,67	1100	0,90
220	950	0,67	1420	0,89
Bronz	420	0,60	670	0,79

Uvedené vztahy (1.7) až (1.11) platí pro frézování, kdy je v záběru pouze jeden zub. Nicméně při reálném frézování je většinou v záběru více zubů frézy zároveň. Výsledná řezná síla je tedy závislá na dvou parametrech. Prvním parametrem je počet zubů frézy v záběru a druhým parametrem je okamžitá poloha zubů frézy, které jsou pod úhlem φ_i vzhledem k obrobku [2, 3, 5].

Počet zubů současně zabírajících je možno získat dle vztahu (1.12) [2].

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \quad (1.12)$$

kde: n_z [-] - počet zubů frézy v současném záběru
 φ_{max} [°] - maximální úhel posuvového pohybu
 z [-] - počet zubů frézy

Celková řezná síla F_c se pro válcové frézování určí ze vztahu (1.13) [2].

$$F_c = \sum_i F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_i \sin^x \varphi_i [N] \quad (1.13)$$

Celková řezná síla F_c se pro čelní frézování určí ze vztahu (1.12) [2].

$$F_c = \sum_i F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sum_i \sin^x \varphi_i [N] \quad (1.14)$$

Složky celkové řezné síly F_c mohou být dopočítány, v případě že je znám úhel působení celkové řezné síly F_c . Častěji jsou však tyto složky určovány z empiricky získaných výrazů. Tyto výrazy jsou vztaženy k velikosti síly F_c [2].

- $F_{cN} = (0,60 \div 0,80) \cdot F_c$
- $F_{fN} = (0,20 \div 0,30) \cdot F_c$ – pro nesousledné frézování
- $F_{fN} = (0,75 \div 0,80) \cdot F_c$ – pro sousledné frézování
- $F_f = (1,00 \div 1,20) \cdot F_c$ – pro nesousledné frézování
- $F_f = (0,80 \div 0,90) \cdot F_c$ – pro sousledné frézování

2 POVLAKOVÁNÍ SLINUTÝCH KARBIDŮ

Vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů s tenkými povrchovými vrstvami TiC se začaly objevovat na trhu koncem 60. let 20. století. Byla to firma Sandvik Coromant, která jako první přišla na trh s tímto materiálem pro obrábění. Povlak TiC byl vyroben metodou CVD a měl tloušťku $4\div 5\text{ }\mu\text{m}$. Avšak povlak TiC byl pouze začátkem ve vývoji tenkých povrchových vrstev. Po čase byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN. Tyto povlaky byly také vytvářeny metodou CVD na substrátech ze slinutých karbidů a poskytovaly výborné řezné vlastnosti. Následně v polovině 70. let 20. století byly vytvořeny povlaky Al_2O_3 . Nicméně z důvodu zajištění dobré adheze musela mezi substrátem a vrstvou Al_2O_3 být mezivrstva TiN. Na začátku 80. let 20. století se začaly objevovat povlaky vytvořené metodou PVD. V dnešní době je přibližně $70\div 75\%$ nástrojů opatřeno povlakem [8, 9, 10].

2.1 Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů

První generace

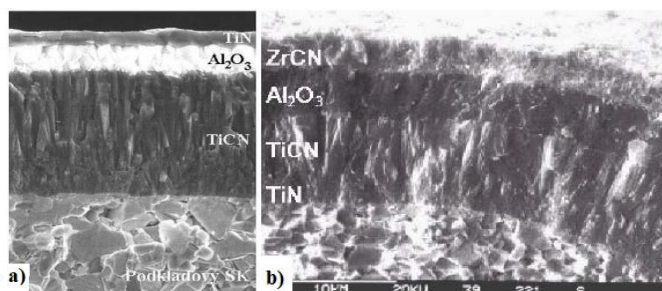
První generaci představuje jednovrstvý povlak (především TiC) s tloušťkou povlaku okolo $6\text{ }\mu\text{m}$. Povlak měl velmi špatnou soudržnost podkladu a povlaku. Tato nepříznivá vlastnost byla způsobena nepřiliš dokonalou technologií výroby, která měla za následek, že docházelo k velmi rychlému odlupování povlaku a ke znehodnocení nástroje [8].

Druhá generace

V druhé generaci byly vytvořeny povlaky, které se vyznačovaly větší tloušťkou než povlak první generace. Vytvářet povlaky o větší tloušťce umožnilo zdokonalení technologie výroby, která zamezila nebezpečí odlupování povlaků při vykonávání funkce nástroje. Tloušťky jednovrstvých povlaků TiC, TiN a TiCN se tedy pohybovaly v rozmezí $7\text{ až }10\text{ }\mu\text{m}$. Do této kategorie mohou být zařazeny povlakované slinuté karbidy od firmy Pramet, konkrétně typ 015 P nebo 020 P [8].

Třetí generace

Povlaky třetí generace mají ostře ohraničené přechody mezi jednotlivými vrstvami povlaku. Jedná se o vícevrstvý povlak (dvě, tři nebo i více vrstev), kdy řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem. Nejprve jsou na podklad nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které však mají nižší odolnost proti opotřebení. Posléze jsou na vrstvy s dobrou přilnavostí nanášeny vrstvy povlaku s vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot. Na podklad jsou nejčastěji nanášeny vrstvy v tomto pořadí: TiC- Al_2O_3 , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC- Al_2O_3 -TiN. Na obr. 2.1 jsou zobrazeny povlaky třetí generace od firem Mitsubishi a WIDIA [8, 9].



Obr. 2.1 Povlak třetí generace od firem: a) Mitsubishi, b) WIDIA [9]

Čtvrtá generace

Do této kategorie spadají speciální vícevrstvé povlaky, které mají velmi často více než 10 vrstev a mezivrstev. Příklad multivrstvého povlaku je vyobrazen na obr. 2.2. Přechody mezi vrstvami jsou více či méně výrazné. Pro tyto povlaky se používají stejné materiály jako u třetí generace. Tyto povlaky jsou vyráběny za pomoci cíleného řízení atmosféry v povlakovacím zařízení. Nespornou výhodou vícevrstvého povlaku je schopnost odklonit či zpomalit šíření trhlin, které narušují povlak od povrchu směrem k substrátu. Do čtvrté generace mohou být zařazeny i povlaky diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové a inteligentní [8, 11].



Obr. 2.2 Multivrstvý povlak TiN/TiCN od firmy Galenite [9]

2.2 Metody povlakování

Výroba povlakovaných slinutých karbidů probíhá tak, že se na podklad, který je vyroben z běžného slinutého karbidu nanáší tenká vrstva materiálu. Nanesená tenká vrstva materiálu má vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Tyto vlastnosti vyplývají ze skutečnosti, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má jemnější zrnitost a méně strukturních defektů. Mimo jiné také povlakový materiál vytváří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje a významně se podílí na zamezování tvorby nárůstku na břitu nástroje [8].

Podle principu nanášení tenkých vrstev jsou metody povlakování rozděleny do dvou základních skupin:

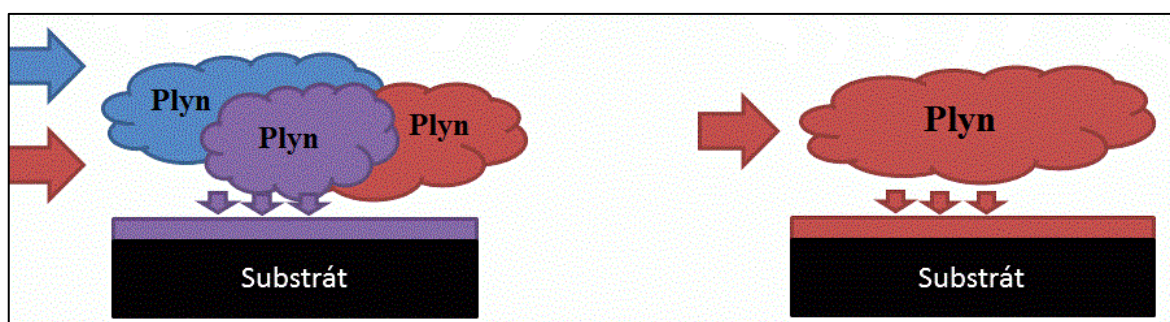
1. Metoda CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze) byla jako první použita pro nanášení povlaků. Povlakování je u této metody chemický proces, který je založen na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, která se vytváří v těsné blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu (obr. 2.3). Následně dochází k uložení heterogenní reakce na tomto povrchu. Celý proces probíhá v uzavřené nádobě – reaktoru. Při této metodě vytváření povlaků jsou vyžadovány vysoké teploty (nad 1000 °C) [8].

Povlaky vytvořené metodou CVD se vyznačují vynikající adhezí mezi podkladem a povlakem, vysokou teplotní stabilitou, vysokou homogenitou a rovnoměrnou tloušťkou u tvarově složitých nástrojů a součástí. Dále metoda CVD umožňuje vytvoření povlaků větších tloušťek (10÷13 μm), povlakování předmětů ze všech stran a vytváření poměrně

složitých vrstev povlaku (nejen nitridů kovů, ale i Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy a diamantové vrstvy) [8, 11]. Nicméně tato metoda má ale následující nevýhody:

- dlouhý pracovní cyklus (8÷10 hodin),
- tahová napětí ve vrstvě,
- nemožnost vytvářet některé typy povlaků (např. TiAlN),
- vysoká energetická náročnost,
- vysoké pracovní teploty, které mohou nepříznivě ovlivnit vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku,
- nelze povlakovat ostré hrany [8].



Obr. 2.3 Nanášení vrstvy povlaku metodou CVD [12]

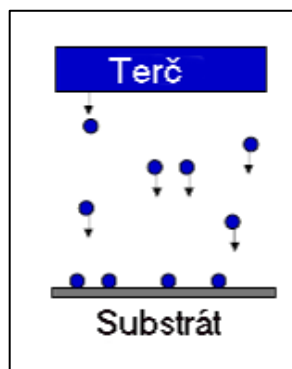
Metoda CVD nezůstala beze změny, ale byly vyvíjeny její různé modifikace. Mezi modifikované CVD metody patří:

- metoda CVD se žhavicím vláknem (HFCVD – Hot Filament CVD),
- laserem indukovaná CVD metoda (LICVD, LCVD – Laser Induced CVD),
- plazmaticky aktivovaná CVD metoda (PACVD – Plasma Activated CVD),
- metoda MTCVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition) [8, 9].

2. Metoda PVD

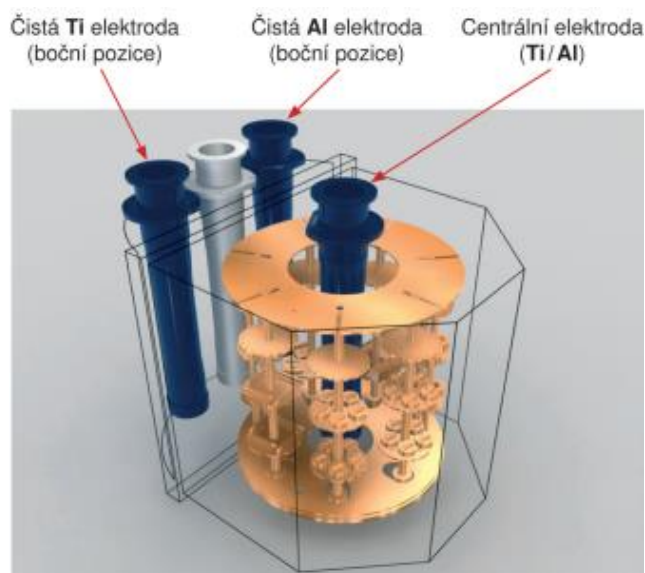
Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) byla vynalezena na začátku 80. let 20. století. Tato metoda byla vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, protože využívá nízkých pracovních teplot. Teploty se pohybují pod hodnotou $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, čímž tedy nedochází k tepelnému ovlivnění nástroje. Nyní se tato metoda používá i pro povlakování břitových destiček ze slinutých karbidů [8, 11].

Nanášení povlaků u metody PVD probíhá za sníženého tlaku ($0,1\div 1\text{ Pa}$) kondenzací částic, které jsou uvolňovány ze zdroje částic fyzikálními metodami, a to rozprašováním nebo odpařováním. Takto uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s inertními a reaktivními plyny, které tvoří atmosféru komory. Částice jsou posléze záporným předpětím urychlovány k povrchu substrátu viz obr. 2.4. Na povrchu substrátu vytvářejí tenké vrstvy homogenního povlaku. Povlaky jsou vytvářeny buď napařováním, napařováním či iontovou implantací [8].



Obr. 2.4 Nanášení vrstvy povlaku metodou PVD [13]

Jak již bylo řečeno, metoda PVD pracuje za nízkých teplot, a z tohoto důvodu nemá špatný vliv na vlastnosti podkladu. Dále také umožňuje povlakovat ostré hrany a nevytvářejí se na povrchu nežádoucí povrchová tahová napětí, nýbrž napětí tlaková. Na druhou stranu ovšem vyžaduje preciznější úpravu podkladu před povlakováním a další nevýhodou je tzv. stínový efekt. Stínový efekt způsobuje, že se na plochách odvrácených od místa odpařování povlakového kovu nevytvoří povlak nebo se vytvoří pouze nedokonalá vrstva povlaku. Z tohoto důvodu je nutné umisťovat povlakované nástroje do rotačních držáků. Tímto je poté zajištěno rovnoměrné nanesení povlaku. Příkladem zařízení pro nanášení vrstev povlaků metodou PVD může být povlakovací zařízení $\pi 300$ (viz obr. 2.5) [8, 11, 14, 15].

Obr. 2.5 Povlakovací komora zařízení $\pi 300$ [14]

2.3 Typy povlaků

Mezi základní typy povlaků v současné době patří následující:

- **TiN** (nitrid titanu) - povlak vytvořený metodou PVD a při jehož nanesení dosáhneme vyšší tvrdosti a vysoké teploty oxidace [15].

- **TiCN** (titancarbonitrid) - povlak má podobné vlastnosti jako TiN, ale uhlík přispívá k tvrdosti a povrchové kluznosti povlaku [15].
- **TiAlN** a **AlTiN** (titanaluminiumnitrid) – zvyšuje životnost nástroje v aplikacích, kde nastává prudké uvolňování tepla (při suchém obrábění). Povlak je velmi vhodný pro vysokorychlostní aplikace. Povlaky z TiAlN a AlTiN nejsou úplně stejné. Z důvodu rozdílného procentuálního zastoupení hliníku a titanu má povlak z AlTiN vyšší tvrdost povrchu [15].
- **CrN** (nitrid chromu) - hlavní použití povlaku je při plynulém řezu a je velmi vhodný jako řešení proti vzniku nárůstku [15]
- **Diamant** - poskytuje vynikající obráběcí výkon pro neželezné kovy. Pro obrábění ocelí a feritických materiálů je však zcela nevhodný, jelikož by mohlo dojít ke vzájemné chemické reakci a následnému zničení pojiva povlaku. Částečně může být využit i pro obrábění grafitu, kompozitů s kovovou maticí a slitin hliníku s velkým podílem křemíku [15].

2.4 Povlaky od firmy SHM, s.r.o.

Společnost SHM se zabývá přípravou PVD povlaků pro různé průmyslové aplikace. Pro přípravu povlaků využívají technologie - odpařování pomocí nízkonapěťového oblouku a magnetronové naprašování. Seznam vybraných PVD povlaků od firmy SHM je uveden v tab. 2.1, ukázky vrstev povlaků jsou na obr. 2.6 [16].

Tab. 2.1 Typy a vlastnosti PVD povlaků od firmy SHM, s.r.o. [17]

Povlak	Podkladový materiál	Typ povlaku	Mikrotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Drsnost Ra [μm]	Tepelná stabilita [°C]
MARWIN SI	SK	Nanokompozitní povlak TiAlSiN	45	2 ÷ 3	0,1 ÷ 0,2	>1000
MARWIN G	SK, HSS	Nanovrstvený gradientní systém AlTiN	38	2 ÷ 3	0,1 ÷ 0,2	>900
ALWIN		Nanokompozitní povlak CrAlSiN s vysokým obsahem Cr	35	2 ÷ 4,5	0,15 ÷ 0,2	>1000
DARWIN		Povlak AlTiN s vysokým obsahem Al	43	1 ÷ 6	0,05 ÷ 0,1	>900
TiN		Povlak TiN s minimálním obsahem Al	25	2 ÷ 3	0,1 ÷ 0,2	~500

Pokračování tab. 2.1

Povlak	Podkladový materiál	Typ povlaku	Mikrotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Drsnost Ra [μm]	Tepelná stabilita [°C]
TiCN MP		Gradientní povlak TiCN	34	1 ÷ 4	0,2 ÷ 0,25	400
CrTiN		Povlak CrTiN	30	1 ÷ 3	0,1 ÷ 0,25	600



Obr. 2.6 Povlak MARWIN SI (vlevo) a povlak MARWIN G (vpravo) [17]

3 METODY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL

3.1 Mechanismus vzniku síly řezání

Při vnikání řezného klínu do materiálu obrobku vzniká v obráběném materiálu stav napjatosti, který způsobuje v mezní situaci jeho dělení. Proces oddělování materiálu je doprovázen deformačními jevy (plastické a elastické deformace) a silovými poměry. Silové poměry jsou tvořeny silou obrábění (řezání) F a řezným odporem R . Řezný odpor je důsledkem stavu napjatosti v obráběném materiálu. Tento odpor musí síla obrábění (řezání) při řezném procesu neustále překonávat. Tyto dvě síly na sebe působí opačně, a proto musí platit podmínka rovnováhy dle vztahu (3.1) [18].

$$F = -R \quad (3.1)$$

kde: F [N] - síla obrábění
 R [N] - řezný odpor

3.2 Typy dynamometrů

Při experimentálních měřeních silové zatížení většinou měříme pomocí dynamometrů (zařízení pro měření řezných sil). Dynamometry jsou rozdělovány podle následujících hledisek: [19]

Rozdělení podle počtu měřených složek síly řezání

- jednosložkové,
- dvousložkové,
- tříložkové,
- dynamometry pro měření krouticích momentů [19].

Rozdělení podle metody obrábění jsou dynamometry

- pro soustružení,
- pro frézování,
- pro vrtání,
- pro broušení [19].

Rozdělení podle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační

- mechanické,
- hydraulické,
- pneumatické,
- elektrické [19].

3.3 Elektrické dynamometry

Elektrické dynamometry jsou v technické praxi nejvíce používanými zařízeními pro měření složek řezných sil. Rozšíření elektrických dynamometrů je způsobeno díky snadnému přenosu dálkového signálu, možnosti snímání signálu při rotujících a pohybujících se součástech, využití velmi malých měřících elementů, možnosti registrace zachycených signálů různých průběhů a frekvencí a v neposlední řadě i rozsáhlá dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu [19].

Elektrické dynamometry jsou rozděleny podle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační na dynamometry [19]:

- indukční,
- kapacitní,
- odporové,
- piezoelektrické.

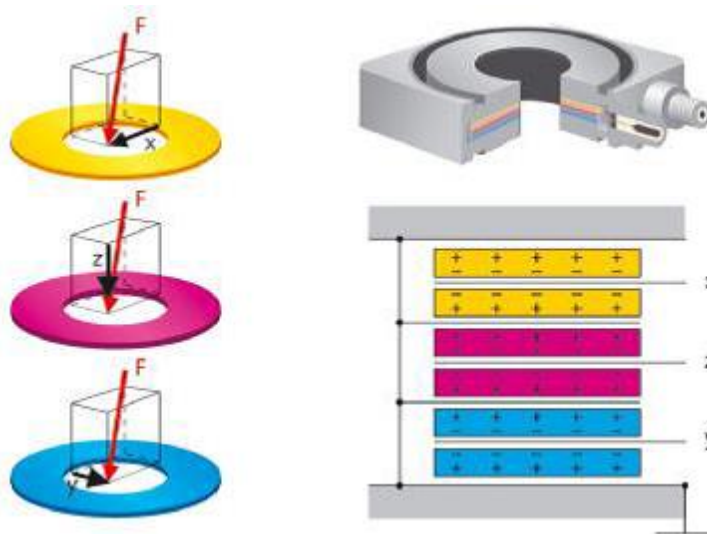
3.3.1 Piezoelektrické dynamometry

Ke konstrukci tohoto typu dynamometru se využívá piezoelektrického jevu, jehož podstata spočívá v tom, že uvnitř některých polykrystalických dielektrik vzniká vlivem mechanické deformace elektrická polarizace, čímž se na povrchu tvoří zdánlivé náboje, které mohou na přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat náboje skutečné. Po odeznění napětí se dielektrikum dostává do původního stavu [20, 21].

Nejpoužívanějšími piezoelektrickými materiály jsou křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli, apod. Z příslušného krystalu se vyřízne měřící destička, která je základem piezoelektrického snímače. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a při odlehčení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při nulové zátěži [19]. Piezoelektrický dynamometr určený pro frézování je vyobrazen na obr. 2.1 a na obr. 2.2 je možno vidět princip měření piezoelektrického dynamometru.



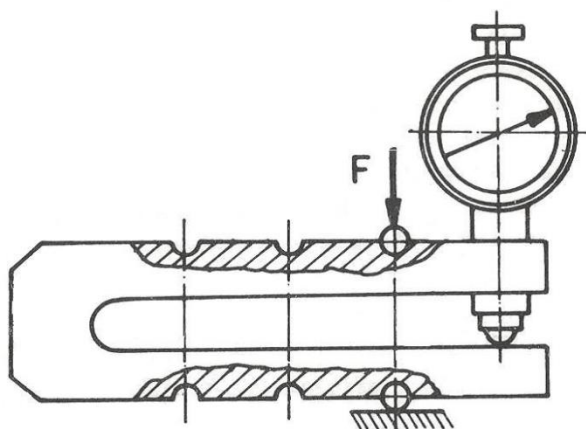
Obr. 3.1 Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B pro měření složek řezné síly [22]



Obr. 3.2 Princip měření piezoelektrického dynamometru [23]

3.4 Mechanické dynamometry

U tohoto typu dynamometru se působení síly přenáší přímo na měřicí prvek (viz obr. 3.3). Velikost působící síly se určuje z deformace silových pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, apod. Mechanické dynamometry se vyznačují svou jednoduchostí, spolehlivostí, stálostí údajů a stálou přesností v rozmezí 0,5 až 2 %. Avšak mají i spoustu nevýhod, které omezují jejich použití. Mezi nevýhod mechanických dynamometrů patří závislost jejich údajů na teplotě, obtížná změna rozsahu měření, nutnost vymezování vůlí v mechanismech, únava materiálu a velká setrvačnost systému. I přesto tyto nevýhody se mechanické dynamometry používají pro cejchování jiných dynamometrů, protože u nich lze zaručit, že nebudou ovlivňovány rušivými vlivy a dále jsou charakteristické lineárním vztahem mezi sledovanou silou a vlastními naměřenými údaji [19].



Obr. 3.3 Mechanický třmenový dynamometr [19]

4 NÁVRH TESTOVÁNÍ VBD

Tato kapitola obsahuje informace o obráběcí soustavě, obráběném materiálu, řezných podmínkách a zařízení pro měření silového zatížení. V poslední části této kapitoly byl proveden teoretický výpočet řezných sil a měrných řezných sil. Teoretické výpočty byly provedeny dle odborné literatury, viz [2] a podle metodiky firmy Walter, viz [32].

4.1 Obráběcí stroj

Testování vyměnitelných břitových destiček bylo provedeno na vertikální frézce FB 32V (viz obr. 4.1). Tato vertikální frézka je součástí vybavení dílen Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně.

Nastavení otáček vřetena, pracovních posuvů stolu a šířky záběru hlavního ostří probíhá ručně pomocí pák umístěných přímo na stroji. Pomocí závěsného ovladače se zapínají/vypínají rychloposuvy, otáčky vřetena a jiné důležité funkce stroje. Frézka disponuje širokým rozsahem otáček vřetena a posuvů stolu, což umožňuje využití stroje při různých technologických operacích. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 4.1.



Obr. 4.1 Vertikální frézka FB 32V

Tab. 4.1 Technické parametry vertikální frézky FB 32 V [24,25]

Technické parametry	
Vnější rozměry stolu	450 × 1400 mm
Otáčky vřetene	28 – 1400 min ⁻¹
Posuv podélný a příčný	10 – 2000 mm.min ⁻¹
Posuv svislý	2,5 - 500 mm.min ⁻¹
Maximální podélný zdvih (osa X)	950 mm
Maximální příčný zdvih (osa Y)	450 mm
Maximální vertikální zdvih (osa Z)	320 mm
Elektromotor pro pohon vřetene	10 kW
Elektromotor pro posuvy	2,2 kW
Hmotnost stroje	3800 kg
Maximální zatížení stolu	800 kg
Půdorysná plocha stroje	2980 × 2130 mm

4.2 Obráběný materiál

Pro účely testování byla zvolena konstrukční nelegovaná ocel 12 050, označení podle staré ČSN normy. Dle EN 10083-2-91 má materiál nové označení C45. Tato ocel je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Uvedená ocel se může mít pevnost až 900 MPa a tvrdost se pohybuje v rozsahu 160 – 225 HB. Použití oceli je vhodné pro výrobu hřídelů turbokompresorů, čerpadel, těžních strojů, elektromotorů a dynam. Dále je vhodná na větší ozubená kola, šneky, automobilové klikové hřídele, ojnice, páky řazení, závěsy pružin, čepy a jiné [26, 28]. Chemické složení této oceli je uvedeno v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Chemické složení oceli ČSN 12050 [28]

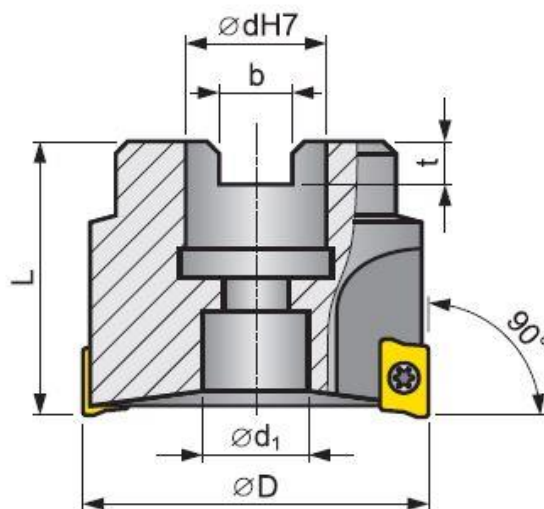
Chemické složení oceli 12 050							
C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]
0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,04	max. 0,04

4.3 Obráběcí nástroj

Pro experiment byla vybrána nástrčná fréza od společnosti Pramet Tools s.r.o. (viz obr. 4.2). Fréza nese označení 63A06R-S90AD11E-C a je do ní možno upnout až šest vyměnitelných břitových destiček. V tab. 4.3 jsou uvedeny technické parametry frézy.

Tab. 4.3 Technické parametry čelní frézy 63A06R-S90AD11E-C [27]

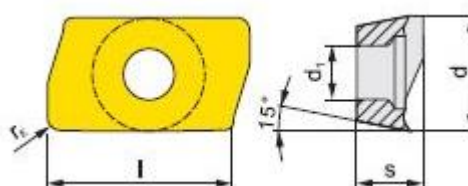
D [mm]	dH7 [mm]	d ₁ [mm]	L [mm]	B [mm]	t [mm]	Z* [-]
63	22	18	40	10,4	6,3	6



Obr. 4.2 Čelní nástrčná fréza 63A06R-S90AD11E-C od firmy Pramet Tools s.r.o. [27]

4.4 Volba vyměnitelné břitové destičky

K testování byla zvolena vyměnitelná břitová destička od strojírenské firmy Pramet Tools s.r.o. s označením ADMX 11 T308SR-F, která je zobrazena na obr. 4.3. Rozměry VBD jsou zapsány v tab. 4.4 a doporučené řezné podmínky pro VBD jsou uvedeny v tab. 4.5.



Obr. 4.3 Schéma vyměnitelné břitové destičky ADMX 11 T308SR-F [27]

Tab. 4.4 Rozměry VBD ADMX 11 T308SR-F [27]

Velikost	l [mm]	d [mm]	d_1 [mm]	s [mm]
11T3	11,00	6,53	2,90	3,97

Tab. 4.5 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro VBD ADMX 11T308SR-F [27, 29]

Rádus	Posuv na zub		Šířka záběru hlavního ostří		Řezná rychlost
r_e [mm]	f_{zmin} [mm.min ⁻¹]	f_{zmax} [mm.min ⁻¹]	$a_{p min}$ [mm]	$a_{p max}$ [mm]	v_c [m.min ⁻¹]
0,8	0,07	0,12	1,0	9,0	210 - 290

Tvar vyměnitelné břitové destičky ADMX se vyznačuje vysoce pozitivní geometrií čela. Úhel čela má hodnotu 23° , z čehož plynou nižší požadavky na příkon stroje. Vysoká pevnost řezné hrany zajišťuje plynulý chod při frézování a vyšší životnost nástroje. Konstrukce řezné hrany je navržena tak, aby co nejvíce snižovala hodnotu řezné síly [29, 30].

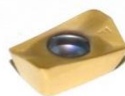
VBD z řady ADMX se vyrábějí z různých materiálů. Pro tento experiment byla zvolena nepovlakovaná VBD ADMX (viz obr. 4.4) a VBD ADMX s PVD povlakem TiAlN (viz obr. 4.5).



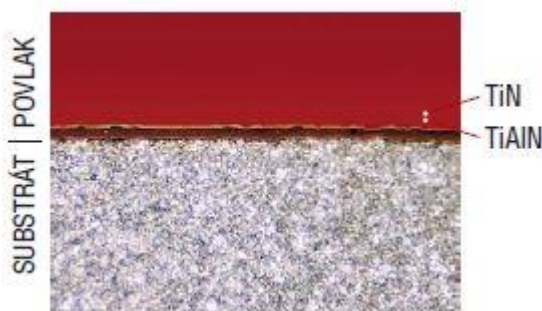
Obr. 4.4 Nepovlakovaná VBD ADMX 11 T308SR-F

VBD ADMX s PVD povlakem TiAlN

Tato vyměnitelná břitová destička je vyrobena z materiálu 8230. Jde o velice univerzální materiál, který je primárně určen pro frézování ocelí, korozivzdorných ocelí, litin, žárupevných slitin, zušlechtěných a kalených ocelí. Substrát materiálu 8230 je slinutý karbid vyráběný z jemně zrnitého karbidu wolframu s 10 % obsahem kobaltu. Na substrát je nanesen multivrstvý povlak metodou PVD. Povlak je kombinací vrstvy na bázi TiN a TiAlN. Vrstva na bázi TiAlN zajišťuje vysokou abrazivní odolnost a vysoký obsah Al v bázi TiAlN pak zvyšuje odolnost vůči oxidaci. Tloušťka povlaku je v rozmezí 3,5 až 5,5 μm . Drsnost povrchu povlaku R_a má hodnotu v rozsahu 0,2 až 0,3 μm , tím je snížena možnost nalepování obráběného materiálu. Rozložení vrstvy substrátu a povlaků TiN a TiAlN je možno pozorovat na obr. 4.6 [14].



Obr. 4.5 Testovaná VBD ADMX 11 T308SR-F s PVD povlakem



Obr. 4.6 Rozložení vrstvy substrátu a povlaku u tetované povlakované VBD [30]

4.5 Volba řezných podmínek

Testování bylo provedeno pro čelní frézování, kdy v nástrčné fríze byla vždy upnuta jedna vyměnitelná břitová destička. Při obrábění nebyla použita procesní kapalina. Při volbě řezných podmínek bylo nutné dodržet doporučené hodnoty udávané výrobcem pro řeznou rychlost, šířku záběru hlavního ostří a posuv na zub. Doporučené hodnoty jsou uvedeny výše v tab. 4.5. V tab. 4.6 a v tab. 4.7 jsou souhrnně sepsány řezné podmínky pro testování VBD.

Tab. 4.6 Řezné podmínky pro čelní frézování při změnách posuvové rychlosti

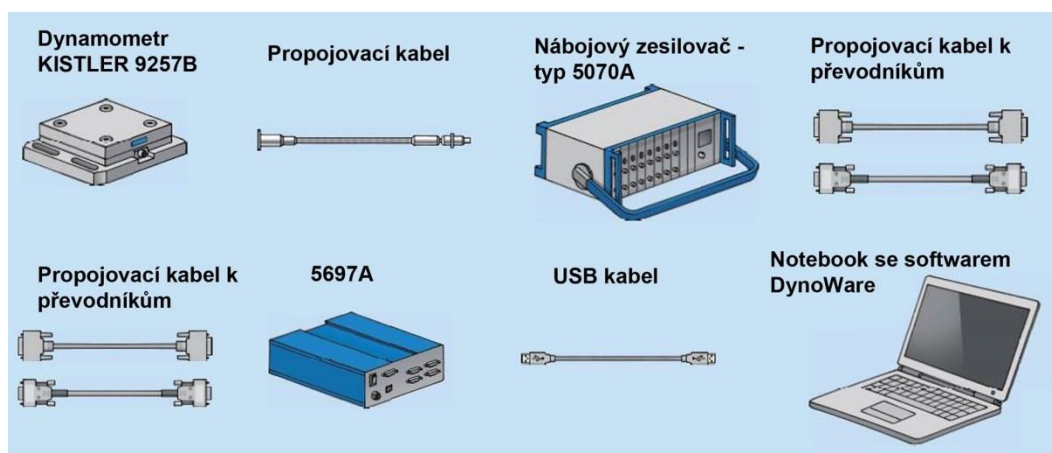
Řezné podmínky				
Řezná rychlost	Otáčky vřetene	Šířka záběru hlavního ostří	Posuvová rychlost	Posuv na zub
v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	a_p [mm]	v_f [mm.min ⁻¹]	f_z [mm]
221,7	1120	2	80	0,071
			100	0,089
			125	0,112

Tab. 4.7 Řezné podmínky pro čelní frézování při změnách šířky záběru hlavního ostří

Řezné podmínky				
Řezná rychlost	Otáčky vřetene	Šířka záběru hlavního ostří	Posuvová rychlost	Posuv na zub
v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	a_p [mm]	v_f [mm.min ⁻¹]	f_z [mm]
221,7	1120	1	100	0,089
		2		
		3		
		4		

4.6 Měřicí aparatura pro měření silového zatížení

Pro měření silového zatížení při čelním frézování byl použit dynamometr KISTLER 9257B. Dynamometr byl přes propojovací kabel spojen nábojovým zesilovačem typu 5070A, který zajistil převod a zesílení měřeného signálu (elektrického náboje) na elektrické napětí. Zpracování signálu proběhlo v notebooku se softwarem DynoWare. Schématické zapojení měřicí aparatury je zobrazeno na obr. 4.7 [31].



Obr. 4.7 Ilustrační schéma zapojení měřicí aparatury KISTLER [22]

4.7 Průběh testování VBD

Testování VBD bylo provedeno v dílně Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně na výše zmíněné vertikální frézce FB 32V. Do vřetene frézky byla upnuta nástrčná čelní fréza 63A06R-S90AD11E-C. Tato fréza byla vždy osazena pouze jednou VBD typu ADMX. Dále byl na stole frézky upnut dynamometr KISTLER 9257B, na jehož horní desku byl připevněn svěrák s polotovarem z materiálu 12 050.

Na začátku testování byly nastaveny otáčky vřetene na hodnotu 1120 min^{-1} , které nebyly v průběhu testování měněny. Poté byla podélná osa obrobku nastavena na střed frézy, aby frézování probíhalo symetricky. Přívod procesní kapaliny byl při testování vypnut, tedy frézování probíhalo za sucha. Po nastavení frézky bylo nutné provést zkušební řez materiálem, a to hned ze dvou důvodů. Prvním důvodem bylo zarovnání čela obrobku, kvůli jeho velké drsnosti. Za druhé bylo potřebné nastavit měřicí zařízení KISTLER. Pro nastavení měřicího zařízení bylo nutné zjistit, jak dlouho bude trvat jeden průjezd frézy materiálem. Hodnota posuvové rychlosti byla nastavena na $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, protože je to nejmenší hodnota posuvové rychlosti z testovacích řezných podmínek a tedy průjezd frézky bude trvat nejdéle. Pomocí stopek bylo zjištěno, že jeden průjezd frézy trval přibližně 120 sekund. Tato hodnota byla zadána do softwaru měřicího zařízení společně se zvolenou vzorkovací frekvencí 1000 Hz.

Samotné testování bylo rozděleno na 2 části. V první části byla nastavována šířka záběru hlavního ostří na 2 mm a měnily se velikosti posuvových rychlostí. Ve druhé části byla nastavena konstantní posuvová rychlost na hodnotu $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a měnila se šířka záběru hlavního ostří. Hodnoty posuvových rychlostí se systematicky měnily podle tab. 5.6 a hodnoty šířky záběru hlavního ostří se systematicky měnily podle tab. 5.7. Pro každou dvojici řezných podmínek byly provedeny tři průjezdy.

Pro účely testování byly k dispozici dvě VBD. Jako první byla testována VBD s PVD povlakem TiAlN, která zvládla celý frézovací cyklus (21 průjezdů). Druhá nepovlakovaná VBD musela být po první části testování (12 průjezdech) otočena, aby byl v záběru nový nepoškozený břit a nebyly zkreslovány výsledky řezných sil velkým opotřebením nástroje.

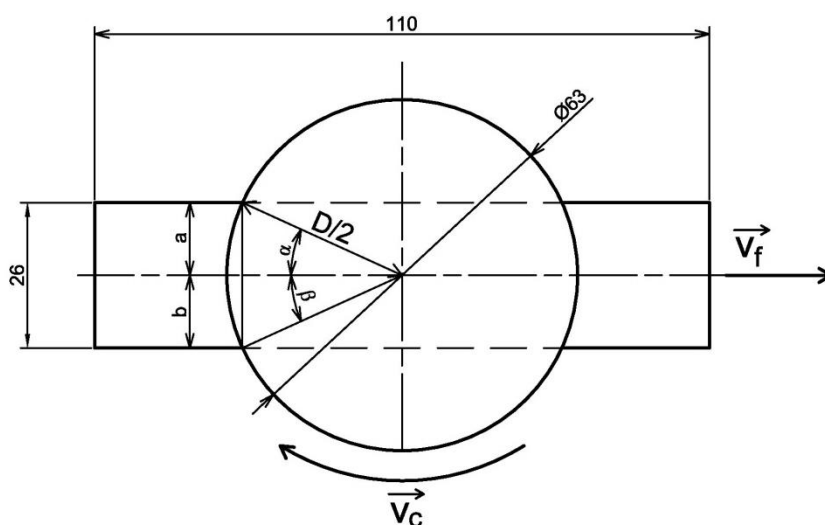
Veškerá naměřená data byla zaznamenávána programem Dynoware, který je následně převáděl do textového souboru, aby mohly být dále zpracovány. Po testování bylo ještě provedeno měření opotřebení nástroje.

4.8 Teoretický výpočet řezných sil při čelní frézování

4.8.1 Výpočet úhlu záběru zubu

Pro všechny metody výpočtu je nutné znát úhel záběru zubu. Na obr. 4.8 lze vidět schéma vzájemné polohy nástroje a obrobku. Pomocí goniometrických funkcí lze dopočítat úhel záběru zubu φ .

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{a}{D} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{13}{63} \right) = 24,37^\circ \quad (4.1)$$

Obr. 4.8 Schéma symetrického frézování pro určení úhlu záběru zubu φ

Jelikož fréza byla nastavena na střed obráběného polotovaru, bylo obrábění symetrické. Z toho důvodu platí $\alpha = \beta$, proto bude mít úhel záběru zubu φ hodnotu:

$$\varphi = \alpha + \beta = 24,37 + 24,37 = 48,74^\circ \quad (4.2)$$

4.8.2 Teoretický výpočet řezné a měrné řezné síly dle odborné literatury

Pro výpočet bylo nejprve nutné určit hodnotu materiálové konstanty C_{Fc} a exponentu x z tab. 1.1, tyto hodnoty byly zapsány do tab. 4.8.

Tab. 4.8 Hodnoty materiálové konstanty C_{Fc} a exponentu x

C_{Fc}	x
2030	0,93

Do vzorců (4.3) až (4.5) byly dosazeny hodnoty ze zvolených řezných podmínek a byly vypočítány hodnoty pro průřez třísky A_D , teoretické řezné síly F_C a měrné řezné síly k_C .

$$A_D = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa_r = 0,071 \cdot 2 \cdot \sin 48,74^\circ \cdot \sin 90^\circ = 0,1074 \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} F_C &= C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x \varphi = \\ &= 2030 \cdot 2 \cdot 0,071^{0,93} \cdot \sin 90^{0,93-1} \cdot \sin^{0,93} 48,74^\circ = 267,6 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} k_C &= \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi)^{1-x}} = \frac{2030}{(0,071 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 48,74^\circ)^{1-0,93}} = \\ &= 2491 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Výsledné teoretické řezné síly a měrné řezné síly pro všechny řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 4.9.

Tab. 4.9 Hodnoty teoretických řezných sil a měrných řezných sil vypočtených dle odborné literatury

Otáčky vřetene	Šířka záběru hlavního ostří	Posuv na zub	Průřez třísky	Řezná síla	Měrná řezná síla
n [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	f _z [mm]	A _D [mm ²]	F _C [N]	k _C [MPa]
1120	Změna posuvu na zub				
	2	0,071	0,1074	267,6	2491
		0,089	0,1343	329,3	2452
		0,112	0,1678	405,2	2414
	Změna šířky záběru hlavního ostří				
	1	0,089	0,0671	164,6	2452
	2		0,1343	329,3	2452
	3		0,2014	493,9	2452
	4		0,2685	658,5	2452

4.8.3 Teoretický výpočet řezné a měrné řezné síly podle metodiky firmy Walter

Pro výpočet bylo nejprve nutné určit hodnotu měrné řezné síly k_{c1} exponentu m_c z katalogu firmy Walter, tyto hodnoty byly zapsány do tab. 4.10.

4.10 Hodnoty měrné řezné síly k_{c1} a exponentu m_c

k_{c1}	m_c
1700	0,25

Do vzorců (4.6) až (4.8) byly dosazeny hodnoty ze zvolených řezných podmínek a byly vypočítány hodnoty pro střední tloušťku třísky h_m , teoretické řezné síly F_C a měrné řezné síly k_C . Hodnoty průřezu třísky A_D jsou vypočítány v podkapitole 4.8.2.

$$h_m = \frac{\left[114,7 \cdot f_z \cdot \sin \kappa \cdot \left(\frac{a_e}{D} \right) \right]}{\varphi} = \frac{\left[114,7 \cdot 0,071 \cdot \sin 90^\circ \cdot \left(\frac{26}{63} \right) \right]}{48,74} = 0,0694 \text{ mm} \quad (4.6)$$

$$k_C = \frac{1 - 0,01 \cdot \gamma_o}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1} = \frac{1 - 0,01 \cdot 23}{0,0694^{0,25}} \cdot 1700 = 2551 \text{ MPa} \quad (4.7)$$

$$F_C = A_D \cdot k_{c1} = 0,1074 \cdot 2550,7 = 273,9 \text{ N} \quad (4.8)$$

Výsledné teoretické řezné síly a měrné řezné síly pro všechny řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 4.11.

Tab. 4.11 Hodnoty teoretických řezných sil a měrných řezných sil vypočtených podle metodiky firmy Walter

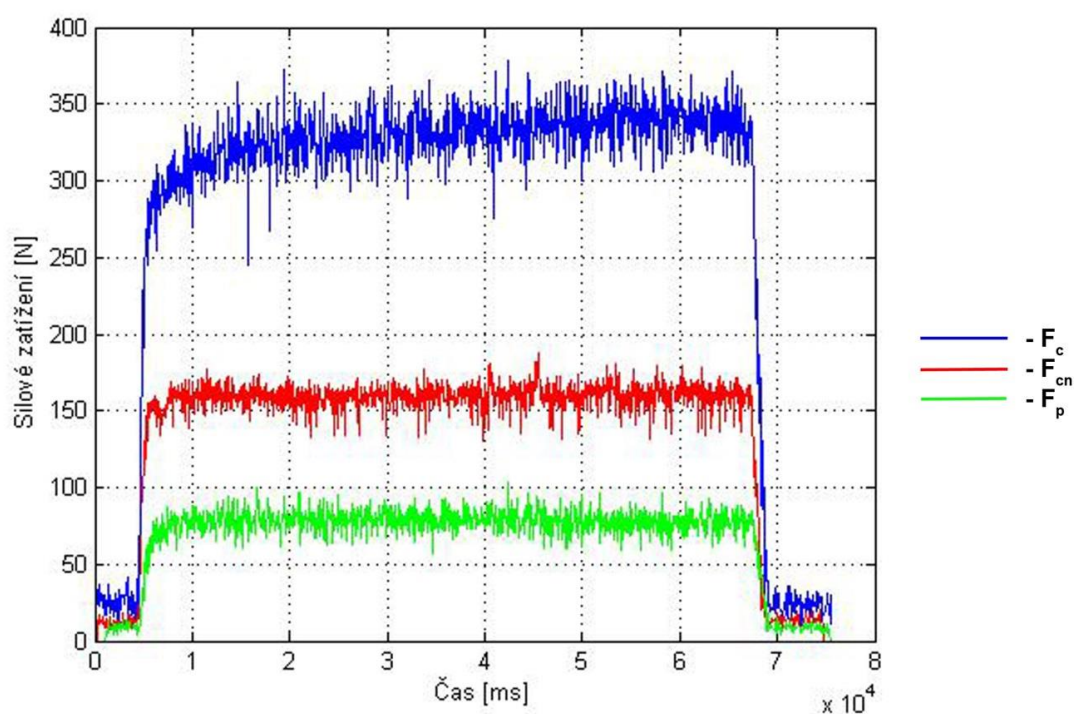
Otáčky vřetene	Šířka záběru hlavního ostří	Posuv na zub	Průřez třísky	Střední tloušťka třísky	Řezná síla	Měrná řezná síla
$n \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	$a_p \text{ [mm]}$	$f_z \text{ [mm]}$	$A_D \text{ [mm}^2\text{]}$	$h_m \text{ [mm]}$	$F_C \text{ [N]}$	$k_C \text{ [MPa]}$
1120		Změna posuvu na zub				
	2	0,071	0,1074	0,0694	273,9	2551
		0,089	0,1343	0,0867	323,9	2412
		0,112	0,1678	0,1084	382,9	2281
		Změna záběru hlavního ostří				
	1	0,089	0,0671	0,0867	161,9	2412
	2		0,1343	0,0867	323,9	2412
	3		0,2014	0,0867	485,8	2412
	4		0,2685	0,0867	647,7	2412

5 ANALÝZA VÝSTUPŮ Z TESTOVÁNÍ

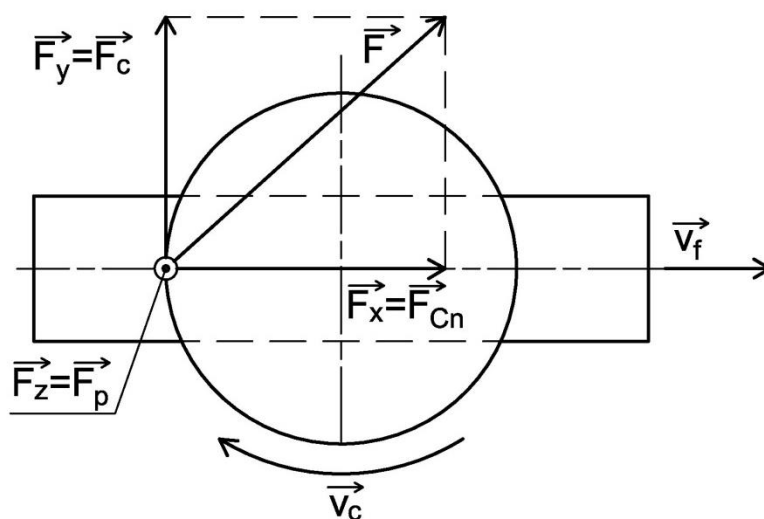
Dynamometr KISTLER 9257B je schopen zaznamenávat velikosti složek silového zatížení řezného nástroje ve třech směrech x , y a z . Tyto složky silového zatížení byly označeny symboly F_x , F_y a F_z . Jejich velikosti byly zaznamenány softwarem DynoWare a převedeny do textového souboru. Jelikož textový soubor obsahoval 120 000 záznamů pro jednotlivé osy, bylo nutné naměřená data vyfiltrovat. Pomocí skriptu vytvořeného v programu Matlab byly vyfiltrovány velikosti silových složek F_x , F_y , a F_z s ohledem na maximální průřez třísky. Poté byla z vyfiltrovaných hodnot spočítána celková řezná síla dle vztahu (5.1) [23]:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (5.1)$$

Z důvodu symetrického čelního frézování odpovídají složky silového zatížení F_x , F_y a F_z naměřené dynamometrem v maximech přímo požadovaným složkám celkové řezné síly F_{Cn} , F_C a F_p . Schématické znázornění silového zatížení při čelním frézování je vyobrazeno na obr. 5.2. Příklad průběhu řezných sil F_{Cn} , F_C a F_p při čelním symetrickém frézování je zobrazen na obr. 5.1. Grafy silového zatížení pro různé řezné podmínky jsou uvedeny v PŘÍLOZE 1-8.



Obr. 5.1 Průběh sil F_C , F_{Cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 5.2 Schématické znázornění silového zatížení při čelním frézování

5.1 Změna šířky záběru hlavního ostří

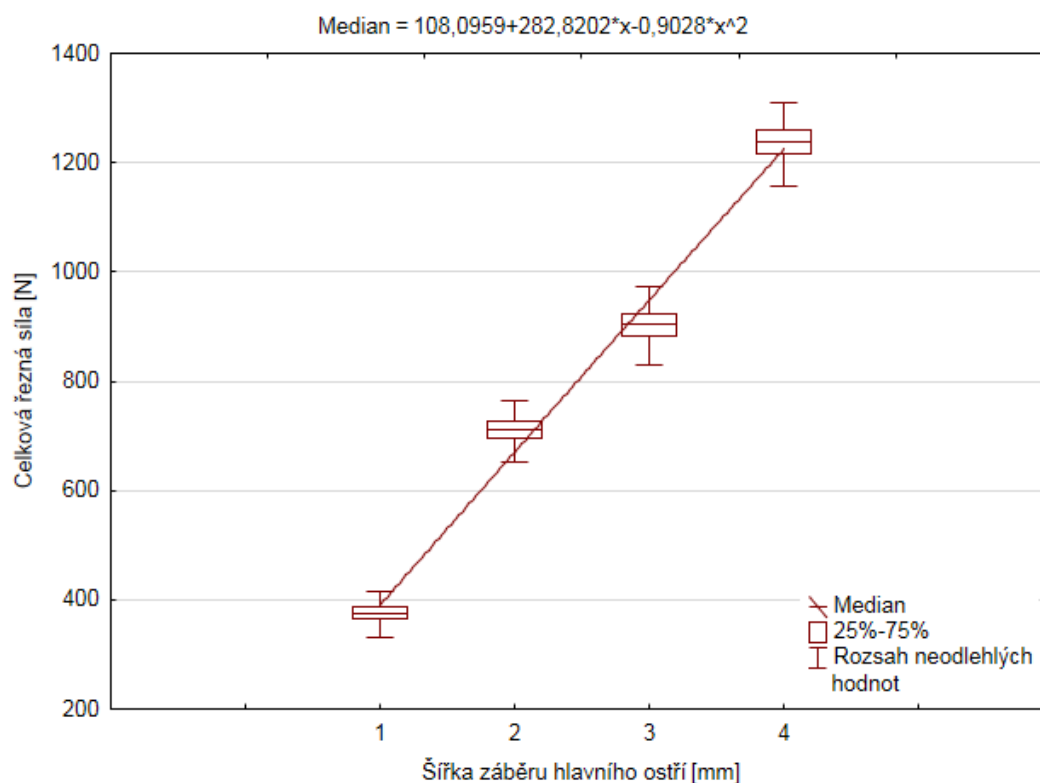
Při zvětšující se šířce záběru hlavního ostří je patrná stále rostoucí celková řezná síla pro nepovlakovanou VBD i pro VBD s povlakem TiAlN, což je patrné z obr. 5.3 a obr. 5.4. Na začátku testování při šířce záběru hlavního ostří $a_p=1$ mm byly celkové řezné síly pro obě VBD skoro shodné (rozdíl 4,7 N). To je dáno faktem, že nástroj byl při začátku obrábění bez jakéhokoliv opotřebení. Avšak další hodnoty celkových řezných sil se pro nepovlakovanou a povlakovanou VBD výrazně odlišují (při $a_p=4$ mm byl rozdíl 210 N). Je to dáno vysokým opotřebením nepovlakované VBD. Oproti tomu na VBD s povlakem TiAlN nebylo zaznamenáno jakékoliv opotřebení břitu nástroje. Hodnoty opotřebení jsou uvedeny v tab. 5.2. Všechny hodnoty celkových řezných sil jsou uvedeny v tab. 5.1. Změna šířky záběru hlavního ostří nemá výrazný vliv na rozsahy neodlehklých hodnot celkových řezných sil.

Tab. 5.1 Experimentálně zjištěné hodnoty celkových řezných sil

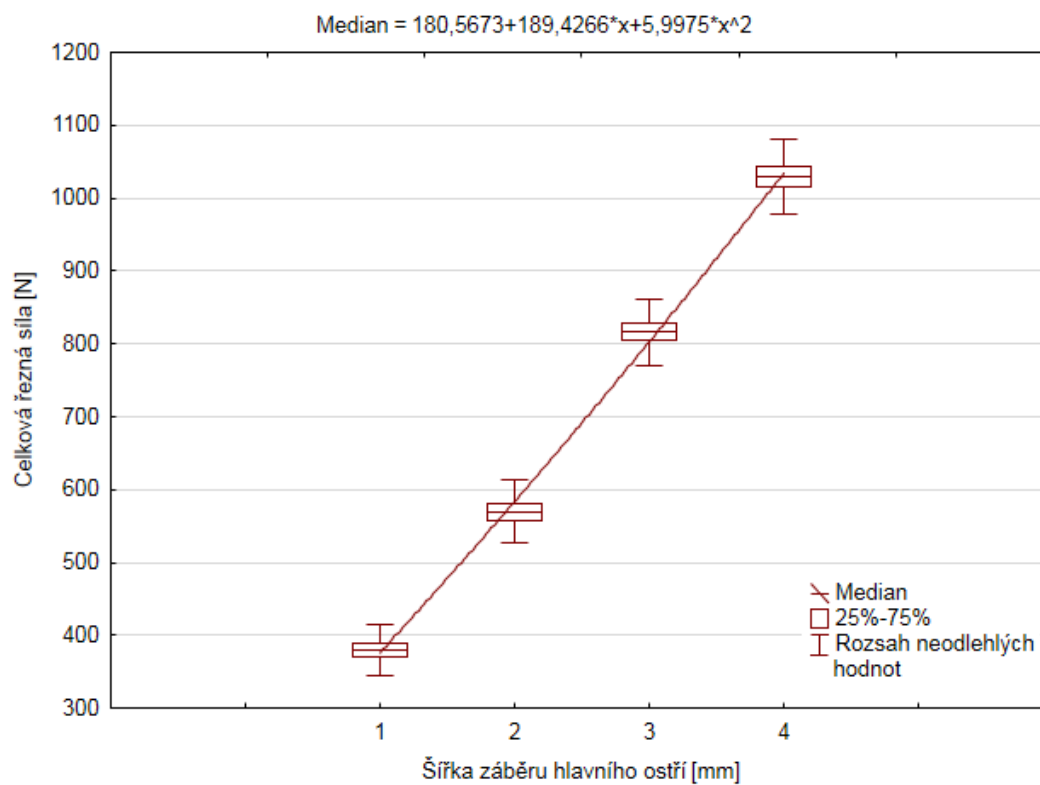
Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	Celková řezná síla [N]		Rozdíl celkových řezných sil [N]
	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN	
1	375,8	380,5	4,7
2	712,9	569,9	143
3	905,7	816,4	89,3
4	1239	1029	210

Tab. 5.2 Hodnoty VB opotřebení pro VBD

Typ VBD	Hodnota VB opotřebení
Nepovlakovaná VBD	0,35 mm
VBD s povlakem TiAlN	Bez měřitelného opotřebení



Obr. 5.3 Vývoj celkových řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří při čelním frézování nepovlakovanou VBD

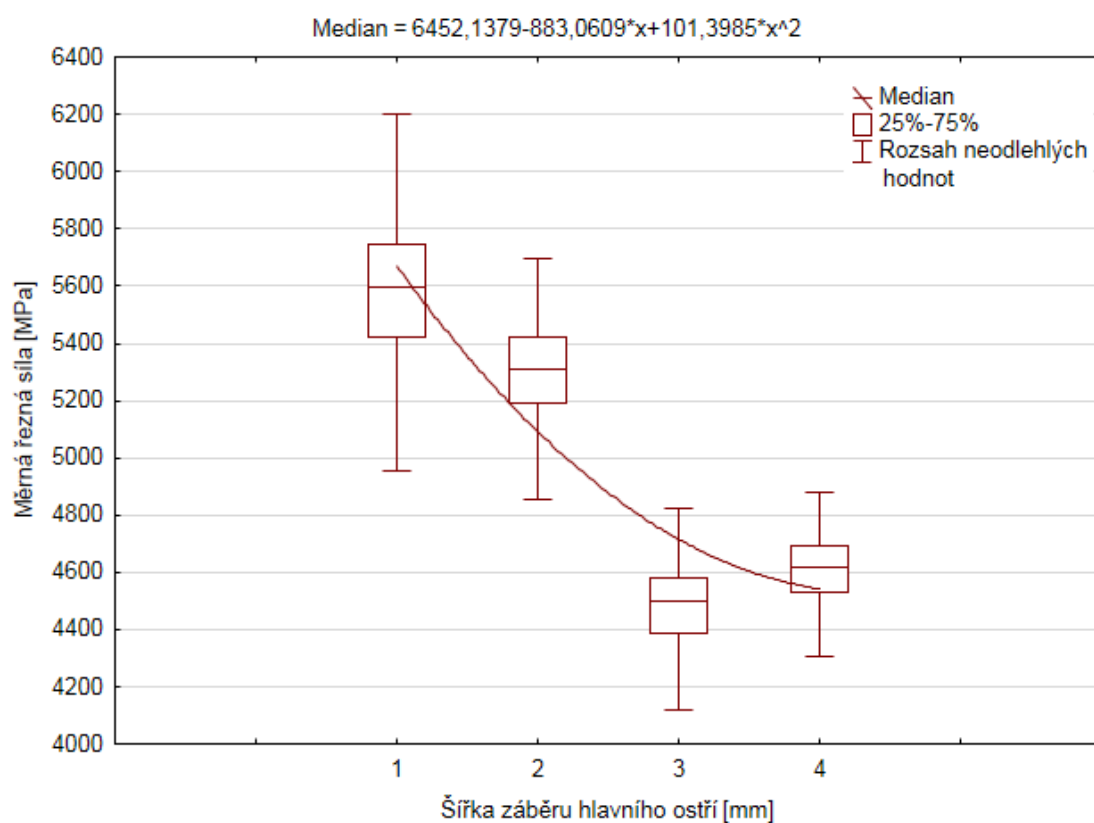


Obr. 5.4 Vývoj celkových řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří při čelním frézování VBD s povlakem TiAlN

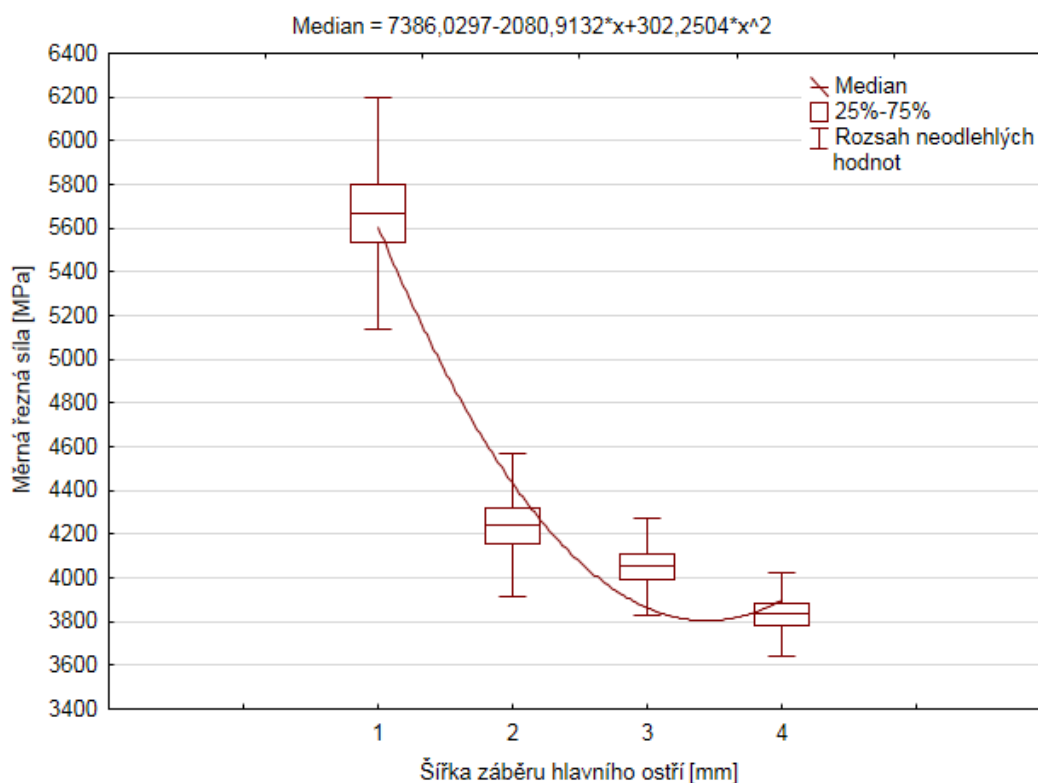
Na obr. 5.5 a obr. 5.6 jsou zobrazeny vývoje měrných řezných sil pro frézování nepovlakovanou VBD a VBD s povlakem TiAlN. Z uvedených grafů je patrné, že při hodnotě $a_p=1$ mm byly hodnoty měrných řezných sil velmi vysoké. Je to dáno faktem, že byla odebírána malá vrstva materiálu. Při vyšší šířce záběru hlavního ostří dochází k rapidnímu poklesu měrných řezných sil viz tab. 5.3.

Tab. 5.3 Hodnoty měrných řezných sil při změnách šířky záběru hlavního ostří

Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	Měrná řezná síla [MPa]	
	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN
1	5597	5670
2	5309	4243
3	4497	4053
4	4607	3835



Obr. 5.5 Vývoj měrných řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří při čelním frézování nepovlakovanou VBD



Obr. 5.6 Vývoj měrných řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří při čelním frézování VBD s povlakem TiAlN

Na obr. 5.7 a obr. 5.8 je možno pozorovat srovnání teoretických hodnot řezných sil a měrných řezných sil s experimentálně zjištěnými hodnotami. Vypočtené teoretické hodnoty vychází z knihy s odborné literatury, viz [2] a metodiky firmy Walter.

Křivky teoretických řezných sil mají skoro shodný průběh. Nicméně od experimentálně zjištěných hodnot se výrazně odlišují. Při $a_p=1$ mm je experimentálně zjištěná hodnota řezné síly u VBD s povlakem TiAlN o 131,2% vyšší než teoretická řezná síla. Ostatní srovnání jsou uvedena v tab. 5.4 a tab. 5.5.

Křivky teoretických měrných řezných sil mají konstantní průběh, jelikož při teoretickém výpočtu měrné řezné síly závisí na posuvu na zub, úhlu záběru a úhlu nastavení hlavního ostří. Všechny tyto parametry jsou konstantní, tudíž i teoretická řezná síla má takovýto průběh. Nicméně testování prokázalo, že tomu tak není a křivky experimentálně zjištěných měrných řezných sil mají silně klesající charakter. Teoretické hodnoty měrných řezných sil se od teoretických hodnot odlišují stejně jako celkové řezné síly.

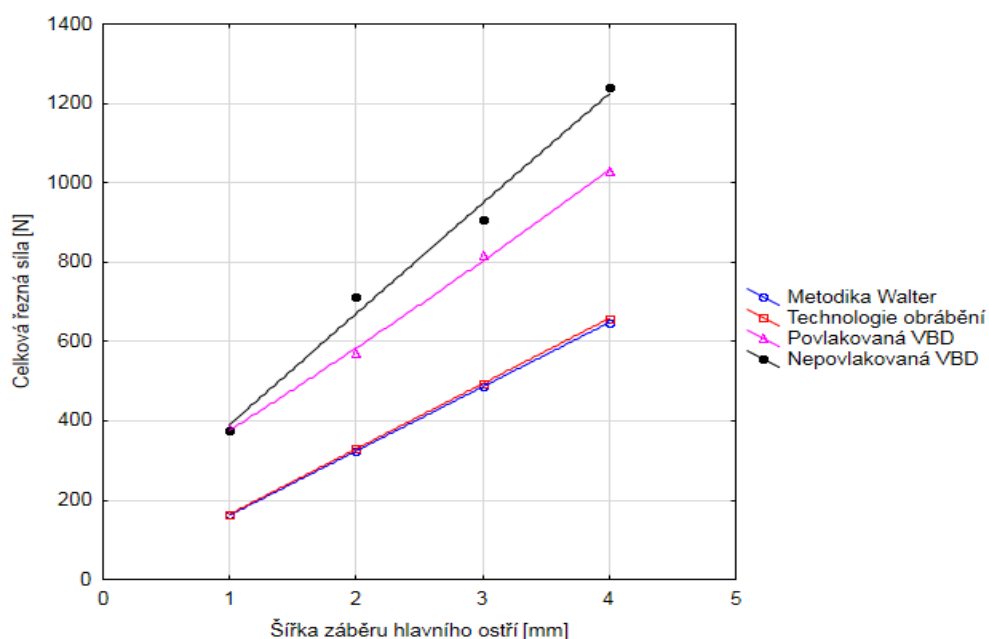
Výrazná odchylka teoretických hodnot a experimentálně zjištěných hodnot je způsobena nestálými podmínkami při experimentu. U teoretických výpočtů se neuvažuje o vlivu opotřebení nástroje, nárůstu teploty kvůli absenci přívodu procesní kapaliny, apod.

Tab. 5.4 Srovnání teoretických hodnot řezných sil vypočtených podle knihy Technologie obrábění a experimentálně zjištěných hodnot celkových řezných sil

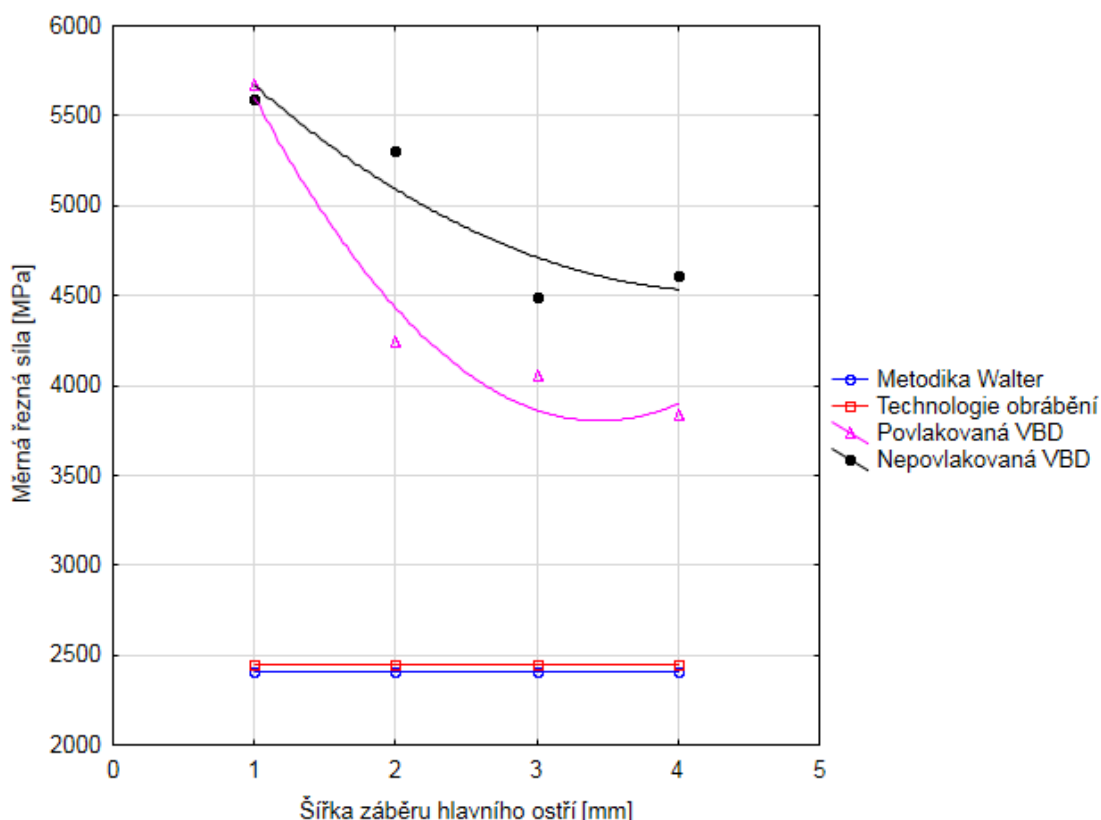
Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	Celkové řezné síly [N]			Srovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot [%]	
	Technologie obrábění	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN
1	164,6	375,8	380,5	128,3	131,2
2	329,3	712,9	569,9	116,5	73,1
3	493,9	905,7	816,4	83,4	65,3
4	658,5	1239	1029	88,2	56,3

Tab. 5.5 Srovnání teoretických hodnot řezných sil vypočtených podle metodiky firmy Walter a experimentálně zjištěných hodnot celkových řezných sil

Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	Celkové řezné síly [N]			Srovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot [%]	
	Metodika firmy Walter	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN
1	161,9	375,8	380,5	132,1	135
2	323,9	712,9	569,9	120,1	75,9
3	485,8	905,7	816,4	86,4	68,1
4	647,7	1239	1029	91,3	58,9



Obr. 5.7 Vývoj teoretických a experimentálně zjištěných celkových řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří při čelním frézování



Obr. 5.8 Vývoj teoretických a experimentálně zjištěných měrných řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří při čelním frézování

5.2 Změna posuvu na zub

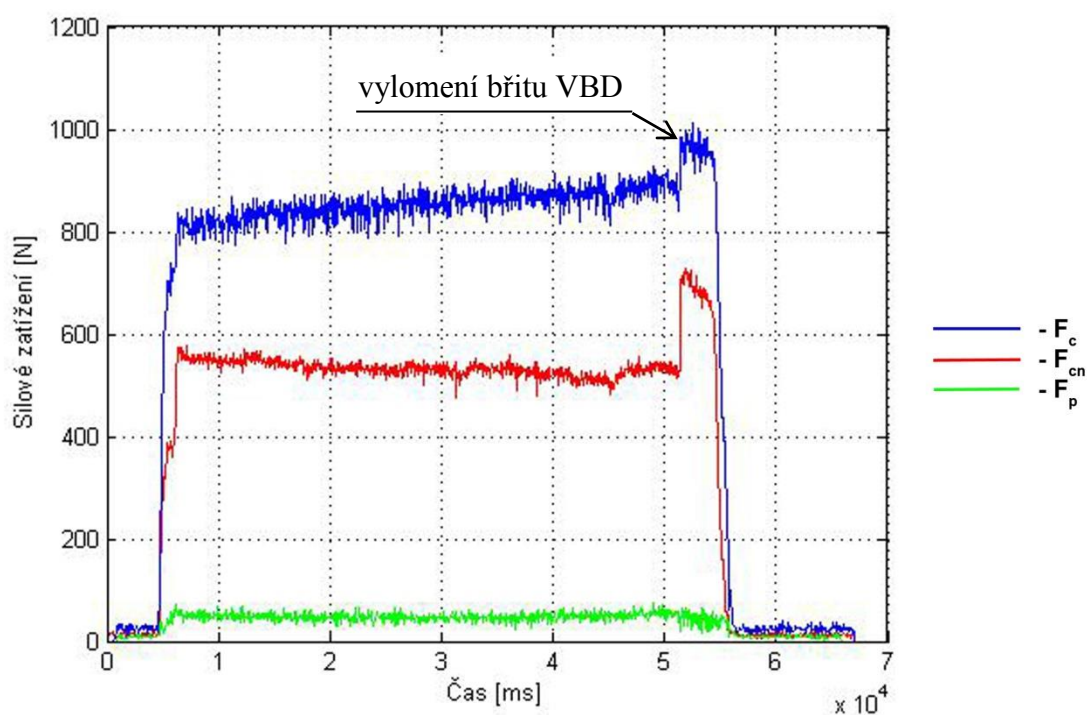
Druhým parametrem, který byl testován a silně ovlivňuje hodnoty řezných a měrných řezných sil, je posuv na zub. Z provedeného měření a následné analýzy bylo zjištěno, že při zvětšující se hodnotě posuvu na zub je patrná stále rostoucí celková řezná síla pro nepovlakovanou VBD i pro VBD s povlakem TiAlN, což je patrné z obr. 5.10 a obr. 5.11. I když byla nepovlakovaná VBD otočena na nový břit a tedy bez žádného poškození, byly řezné síly této destičky mírně vyšší již na začátku testování. Tento rozdíl byl způsoben odřezáváním velmi malé třísky, která byla teplem namáhána a při odřezávání tohoto typu třísek dochází k rychlejšímu opotřebení nástroje. Další hodnoty celkových řezných sil se pro nepovlakovanou a povlakovanou VBD výrazně odlišují (při $f_z=0,112$ mm byl rozdíl 354,6 N). Je to dáno vysokým opotřebením nepovlakované VBD, neboť došlo i k vylomení břitu, jak je poznat ze silového zatížení vyobrazeného na obr. 5.9. Oproti tomu na VBD s povlakem TiAlN bylo zaznamenáno pouze malé opotřebení. Hodnoty opotřebení jsou uvedeny v tab. 5.6. Všechny hodnoty celkových řezných sil jsou uvedeny v tab. 5.7.

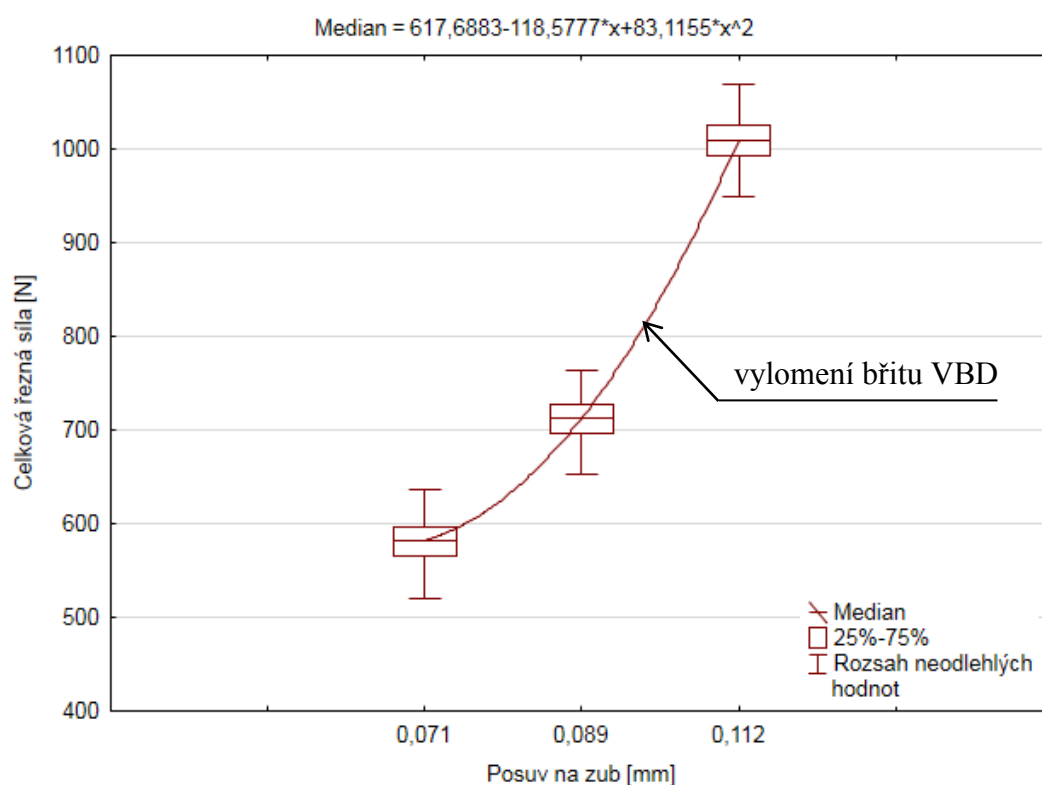
Tab. 5.6 Experimentálně zjištěné hodnoty celkových řezných sil

Posuv na zub f_z [mm]	Celková řezná síla [N]		Rozdíl celkových řezných sil [N]
	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN	
0,071	582,3	531,5	50,8
0,089	712,9	569,9	143
0,112	1009,5	654,9	354,6

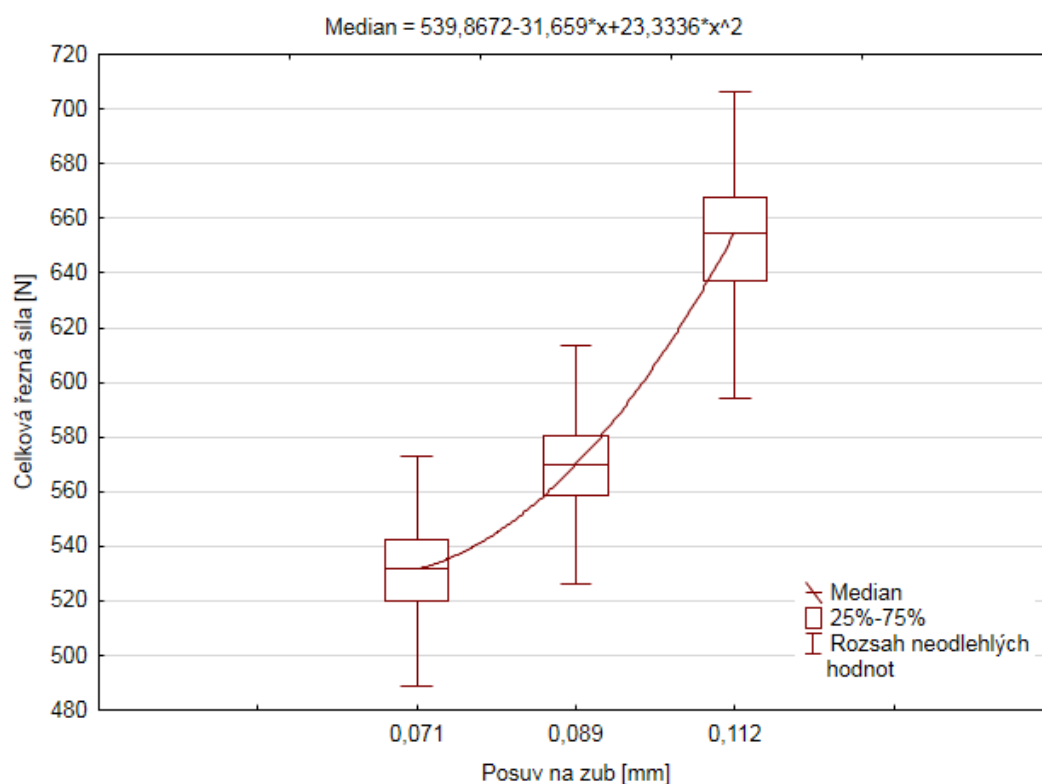
Tab. 5.7 Hodnoty VB opotřebení pro VBD

Typ VBD	Hodnota VB opotřebení
Nepovlakovaná VBD	1,13 mm
VBD s povlakem TiAlN	0,1 mm

Obr. 5.9 Průběh sil F_C , F_{Cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek: $a_p = 2$ mm a $v_f = 125$ mm.min⁻¹



Obr. 5.10 Vývoj celkových řezných sil se změnou posuvu na zub při čelním frézování nepovlakovanou VBD



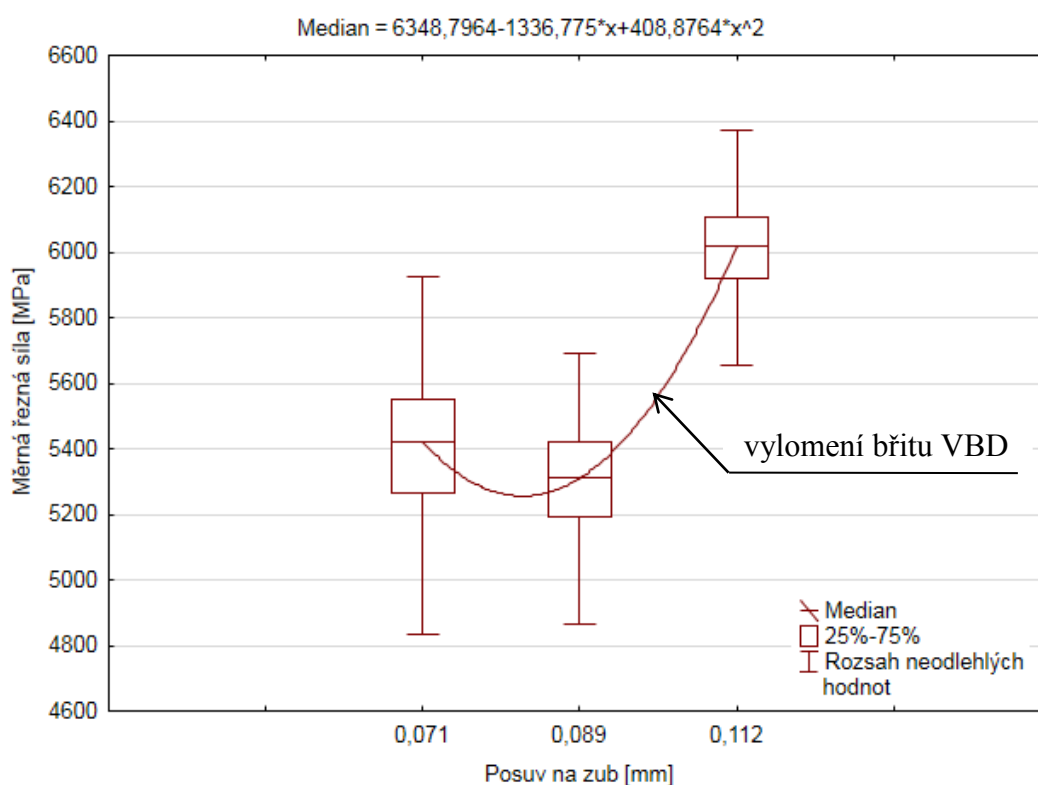
Obr. 5.11 Vývoj celkových řezných sil se změnou posuvu na zub při čelním frézování VBD s povlakem TiAlN

Na obr. 5.12 a obr. 5.13 jsou zobrazeny vývoje měrných řezných sil pro frézování nepovlakovanou VBD a VBD s povlakem TiAlN. Z uvedených grafů je patrné, že při hodnotě $f_z=0,071$ mm byly hodnoty měrných řezných sil velmi vysoké.

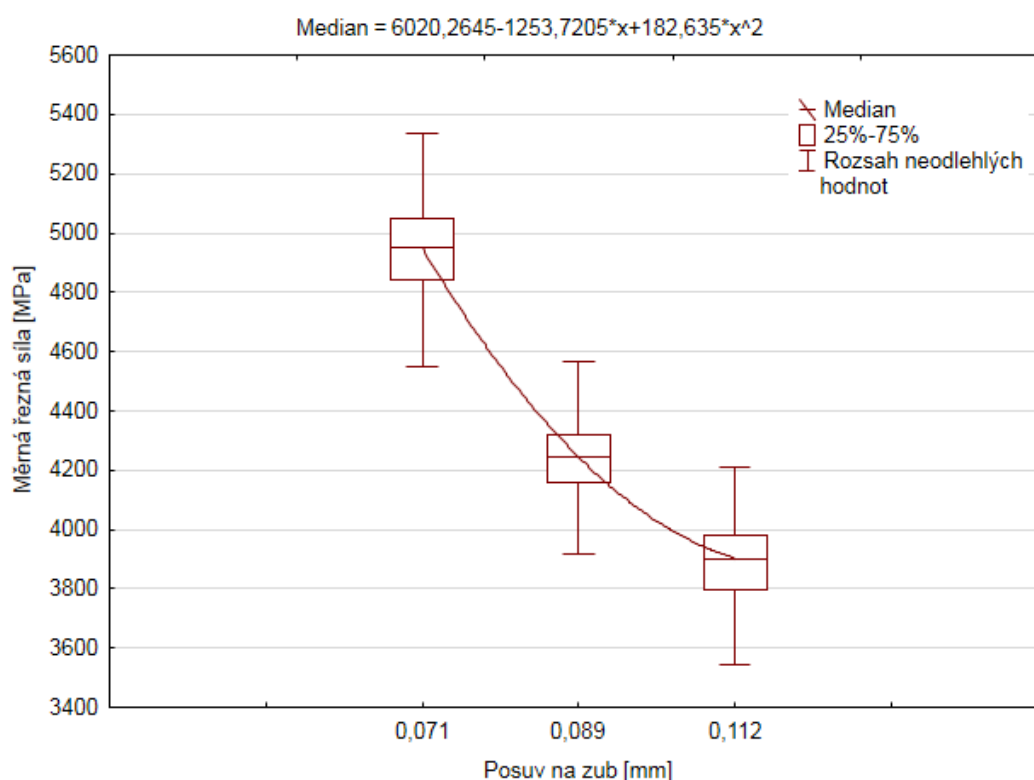
Při vyšších posuvech na zub dochází k rapidnímu poklesu měrných řezných sil u VBD s povlakem TiAlN. Nicméně tento trend není viditelný u nepovlakované VBD. U nepovlakované VBD došlo k výraznému nárůstu měrné řezné síly při $f_z=125 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jak již bylo uvedeno výše, bylo to způsobeno vylomením břitu nástroje. Hodnoty měrných řezných sil jsou souhrnně uvedeny v tab. 5.8.

Tab. 5.8 Hodnoty měrných řezných sil při změnách posuvu na zub

Posuv na zub f_z [mm]	Měrná řezná síla [MPa]	
	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN
0,071	5421	4949
0,089	5310	4243
0,112	6019	3902



Obr. 5.12 Vývoj měrných řezných sil se změnou posuvu na zub při čelním frézování nepovlakovanou VBD



Obr. 5.13 Vývoj měrných řezných sil se změnou posuvu na zub při čelním frézování VBD s povlakem TiAlN

Na obr. 5.14 a obr. 5.15 je možno pozorovat srovnání teoretických hodnot řezných sil a měrných řezných sil s experimentálně zjištěnými hodnotami. Vypočtené teoretické hodnoty vychází z odborné literatury, viz [2] a metodiky firmy Walter.

Křivky teoretických řezných sil mají skoro shodný průběh. Nicméně od experimentálně zjištěných hodnot se výrazně odlišují. Při $f_z=0,071$ mm je experimentálně zjištěná hodnota řezné síly u VBD s povlakem TiAlN o 98,6 % vyšší než teoretická řezná síla. Nicméně tento rozdíl se s rostoucím posuvem na zub snižuje. Ostatní srovnání jsou uvedena v tab. 5.9 a tab. 5.10.

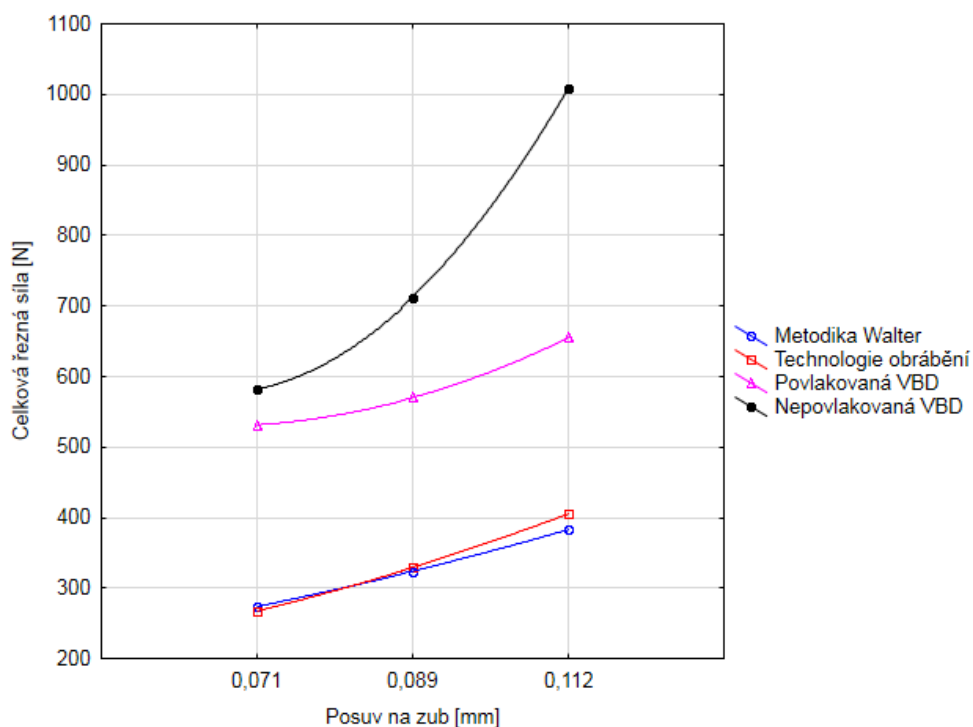
Křivky teoretických měrných řezných sil mají mírně klesající průběh. Nicméně jsou experimentálně zjištěné hodnoty měrných řezných sil podstatně vyšší, ale průběh křivky měrné řezné síly VBD s povlakem TiAlN je také mírně klesající. To však nelze říci o křivce průběhu měrných řezných sil u nepovlakované VBD, křivka je narušena vylomením břitu a tedy v polovině se láme a silně narůstá. Teoretické hodnoty měrných řezných sil se od teoretických hodnot odlišují stejně jako celkové řezné síly.

Tab. 5.9 Srovnání teoretických hodnot řezných sil vypočtených podle knihy Technologie obrábění a experimentálně zjištěných hodnot celkových řezných sil

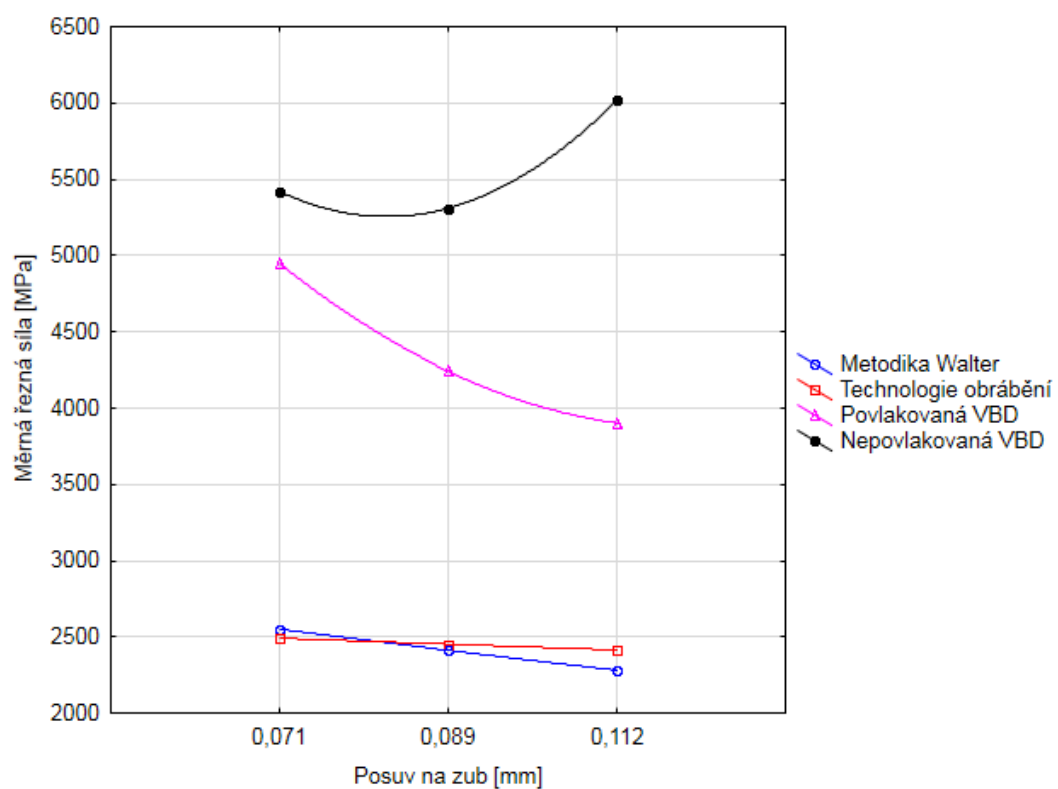
Posuv na zub f_z [mm]	Celkové řezné síly [N]			Srovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot [%]	
	Technologie obrábění	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN
0,071	267,6	582,3	531,5	117,6	98,6
0,089	329,3	712,9	569,9	116,5	73,1
0,112	405,2	1009,5	654,9	149,1	61,6

Tab. 5.10 Srovnání teoretických hodnot řezných sil vypočtených podle metodiky firmy Walter a experimentálně zjištěných hodnot celkových řezných sil

Posuv na zub f_z [mm]	Celkové řezné síly [N]			Srovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot [%]	
	Metodika firmy Walter	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN	Nepovlakovaná VBD	VBD s povlakem TiAlN
0,071	273,9	582,3	531,5	112,5	94,1
0,089	323,9	712,9	569,9	120,1	75,9
0,112	382,9	1009,5	654,9	163,9	71,1



Obr. 5.14 Vývoj teoretických a experimentálně zjištěných celkových řezných sil se změnou posuvu na zub při čelním frézování



Obr. 5.15 Vývoj teoretických a experimentálně zjištěných měrných řezných sil se změnou posuvu na zub při čelním frézování

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést měření silového zatížení dvou vybraných vyměnitelných břitových destiček (VBD) za účelem analýzy řezných sil při čelním frézování. Jednalo se o vyměnitelné břitové destičky typu ADMX 11 T308SR-F od společnosti Pramet Tools s.r.o., konkrétně o nepovlakovanou VBD a VBD deponovanou PVD povlakem TiAlN. Měření bylo provedeno při konstantních otáčkách, hodnoty posuvu na zub nebo šířky záběru hlavního ostří byly systematicky měněny.

Celkové závěry z provedeného experimentu a analýzy jsou následující:

- technologické parametry posuv na zub a šířka záběru hlavního ostří mají významný vliv na změnu celkové řezné síly a měrné řezné síly.
- při zvyšování hodnoty posuvu na zub i šířky záběru hlavního ostří bylo pozorováno nelineární zvyšování řezné síly a nelineární klesání měrné řezné síly u obou VBD.
- na začátku testování byly hodnoty celkové řezné síly i měrné řezné síly pro obě VBD totožné, pouze s minimálním rozdílem.
- při testování změny šířky záběru hlavního ostří se hodnoty celkových řezných sil pro nepovlakovanou VBD a VBD s PVD povlakem TiAlN lišily při $a_p=4$ mm o 210 N.
- při testování změny posuvu na zub se hodnoty celkových řezných sil pro nepovlakovanou VBD a VBD s PVD povlakem TiAlN lišily při $f_z=0,112$ mm o 354,6 N, takto vysoký rozdíl je způsoben vylomením břitu u nepovlakované VBD, což se i projevilo na výrazném zvýšení měrné řezné síly.
- u VBD ze SK s PVD povlakem TiAlN nepřekročilo VB opotřebení hodnotu 0,1 mm.
- nepovlakovaná VBD byla rozsáhle opotřebovaná, po testování posuvu na zub mělo hřbetní opotřebení hodnotu $VB=1,13$ mm a po testování šířky záběru hlavního ostří mělo hřbetní opotřebení hodnotu $VB=0,35$ mm.
- při testování posuvu na zub byly hodnoty celkových řezných sil mnohem vyšší u nepovlakované VBD, z důvodu vylomení břitu.
- hodnoty teoretických řezných i měrných řezných sil jsou velmi rozdílné od experimentálně zjištěných hodnot. Za řezných podmínek $a_p=1$ mm a $f_z=0,089$ mm byl rozdíl teoretických a experimentálně zjištěných hodnot 132,1 % podle metodiky firmy Walter.
- teoretické hodnoty vypočtené dle odborné literatury a metodiky firmy Walter se výrazně neliší.
- při teoretických výpočtech nejsou uvažovány vlivy jako například opotřebení nástroje či vliv narůstající teploty v řezu.

Z výše uvedených závěrů lze konstatovat, že povlak PVD výrazně snižuje hodnoty řezných sil i opotřebení nástroje. Tyto skutečnosti vedou k vysoké životnosti povlakovaných VBD a zvýšení produktivity obrábění ve srovnání s nepovlakovanými VBD ze SK.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003. 138 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [4] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. 1 svazek v různém stránkování. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [5] BUDA, Jan, Ján SOUČEK a Karol VASILKO. *Teória obrábania*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomic. lit, 1983. 356 s.
- [6] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [7] *Měrná řezná síla*. SANDVIK COROMANT [online]. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/the_specific_cutting_force/pages/default.aspx
- [8] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [9] KŘÍŽ, Antonín. *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje*. Plzeň: ZČU v Plzni [online]. 8 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf
- [10] PÍŠKA, Miroslav. *Trendy v PVD a CVD povlakování*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2014, č. 11, s. 70 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
- [11] *Trendy v povlakování slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001, č. 7, s. 43 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
- [12] *Depozice z plynné fáze*. Skupina fyziky povrchů [online]. Praha: Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra fyziky povrchů a plazmatu [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/povrchy/metoda/cvd>
- [13] *Tenké vrstvy*. [online]. 77 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [14] BINDER, Martin a Michal ŠÍMA. *Nový frézovací materiál s PVD povlakem*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2009, č. 4, s. 20 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novy-frezovaci-material-s-pvd-povlakem.html>

- [15] HORVÁTH, Evžen. *Povlakování a životnost nástroje*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2010, č. 12, s. 18 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-a-zivotnost-nastroje.html>
- [16] *Představení společnosti*. SHM [online]. © 1993 - 2013 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/o-spolecnosti/predstaveni-spolecnosti/>
- [17] *PVD povlaky*. SHM [online]. © 1993 - 2013 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/>
- [18] ČEP, Robert. *Měření složek síly řezání*. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže [online]. 8 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [19] ČEP, Robert. *Přímé měření sil a momentů*. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže [online]. 9 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [20] *Piezoelektrické snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [online]. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-05.htm>
- [21] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [22] *Kistler Sensors to Measure Force*. Kistler SHM [online]. © 2014 [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/products/components/force-sensors/>
- [23] ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky: Disertační práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 104 s, 7s příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
- [24] JAROŠ, Aleš. *Aplikace PVD povlaků pro čelní frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2008. 53 s. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška CSc.
- [25] VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení rezných nástrojů při frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2014. 78 s., 2 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [26] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 4. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2008. 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [27] *Frézování 2014*. Katalog společnosti Pramet Tools s.r.o. [online]. 340 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/downloads/milling-2014-cz-sk.pdf>
- [28] *Ocel 12 050*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie [online]. 6 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/database_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf
- [29] *ADMX 11*. Katalog společnosti Pramet Tools s.r.o. [online]. 4 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.precitool.cz/cz/wp-content/uploads/file/ADMX11%20CZ%20screen.pdf>

- [30] *Nový materiál pro frézování 8230*. Katalog společnosti Pramet Tools s.r.o. [online]. 8 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.test.gazela.si/files/grade-8230-en-screen.pdf>
- [31] *Dílčí zpráva k projektu č. 456*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie [online]. 16 s. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf
- [32] *Walter catalog general 2012*. Walter tools [online]. [vid. 25. května 2015]. Dostupné z: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/general-catalogue-2012-en.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ADMX	[-]	Typ vyměnitelné břitové destičky
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition - chemické napařování z plynné fráze
HFCVD	[-]	Hot Filament CVD – metoda CVD se žhavicím vláknem
HSS	[-]	High Speed Steel – rychlořezná ocel
LICVD, LCVD	[-]	Laser Induced CVD – laserem indukovaná CVD metoda
MTCVD	[-]	Middle Temperature CVD – středně teplotní chemické napařování
PACVD	[-]	Plasma Activated CVD – plazmaticky aktivovaná CVD metoda
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
SK	[-]	Slinutý karbid
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A, A_D	$[mm^2]$	Jmenovitý průřez třísky
C_{Fc}	[-]	Materiálová konstanta
D	$[mm]$	Průměr nástroje
F, F_i	$[N]$	Celková řezná síla
F_c, F_{ci}	$[N]$	Řezná síla
F_{Cn}, F_{Cni}	$[N]$	Kolmá složka řezné síly
F_{fi}	$[N]$	Posuvová síla
F_{fNi}	$[N]$	Kolmá posuvová síla
F_p	$[N]$	Axiální složka řezné síly (pasivní síla)
F_x	$[N]$	Síla působící v ose x
F_y	$[N]$	Síla působící v ose y
F_z	$[N]$	Síla působící v ose z
R	$[N]$	Řezný odpor
R_a	$[\mu m]$	Drsnost povrchu povlaku
a_e	$[mm]$	Šířka polotovaru
a_p	$[mm]$	Šířka záběru hlavního ostří

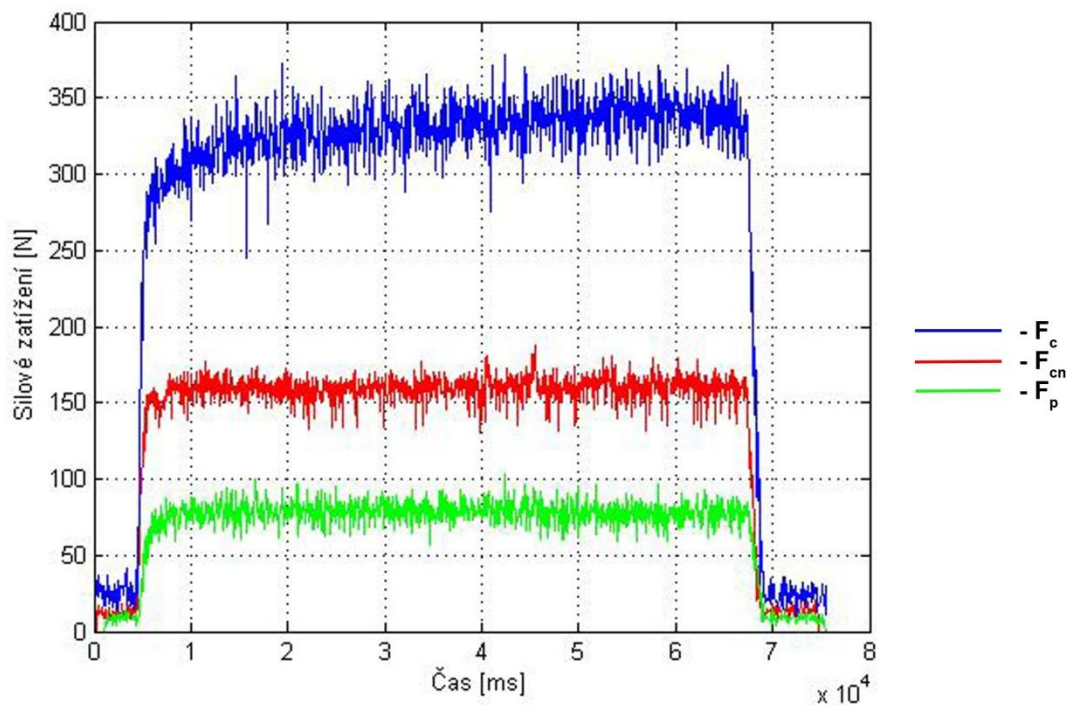
a_{pmax}	[mm]	Maximální hodnota šířky záběru hlavního ostří
a_{pmin}	[mm]	Minimální hodnota šířky záběru hlavního ostří
f_z	[mm]	Posuv na zub
f_{zmax}	[mm.min ⁻¹]	Maximální hodnota posuvu na zub
f_{zmin}	[mm.min ⁻¹]	Minimální hodnota posuvu na zub
h_i	[mm]	Tloušťka odřezávané třísky
h_m	[mm]	Střední tloušťka třísky
k_{c1}	[MPa]	Měrná řezná síla vztažená na 1 mm ² průřezu třísky
k_c, k_{ci}	[MPa]	Měrná řezná síla
l	[mm]	Délka vyměnitelné břitové destičky
m_c	[-]	Exponent
n	[min ⁻¹]	Otáčky nástroje
n_z	[-]	Počet zubů frézy v současném záběru
r_ε	[mm]	Poloměr zaoblení špičky nástroje
s	[mm]	Tloušťka vyměnitelné břitové destičky
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
x	[-]	Exponent vlivu tloušťky třísky
z	[-]	Počet břitů nástroje
γ_o	[°]	Úhel čela
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
φ_i	[°]	Úhel záběru zubu
φ_{max}	[°]	Maximální úhel posuvového pohybu

SEZNAM PŘÍLOH

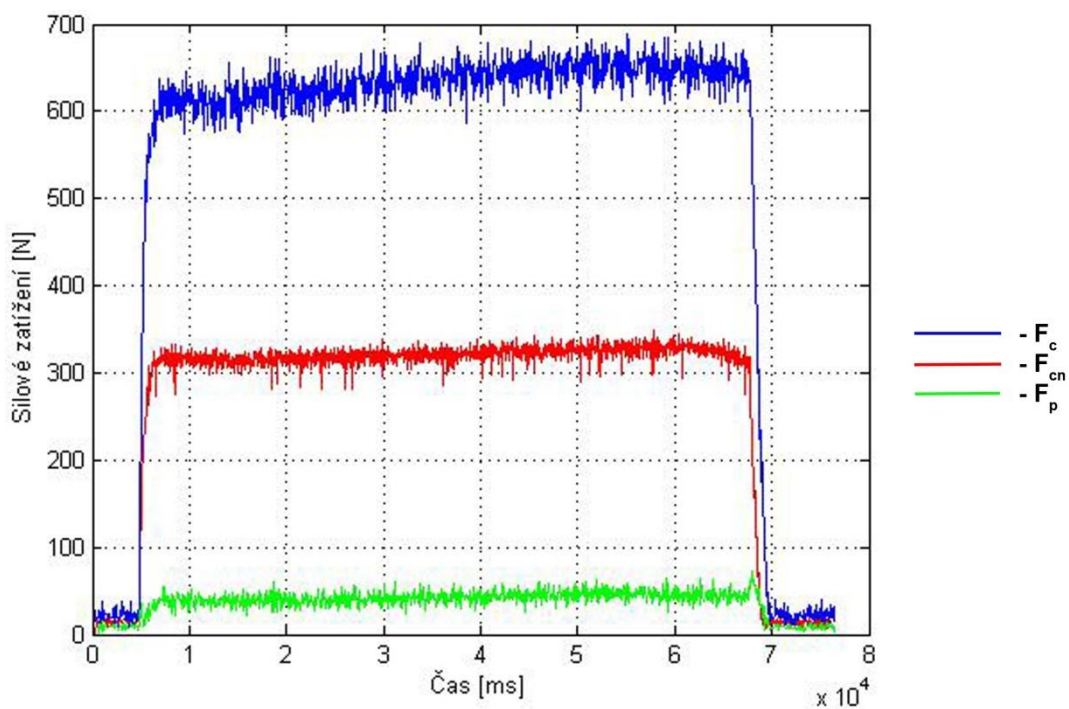
Příloha 1	Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně šířky záběru hlavního ostří (1/2)
Příloha 2	Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně šířky záběru hlavního ostří (2/2)
Příloha 3	Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně posuvu na zub (1/2)
Příloha 4	Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně posuvu na zub (2/2)
Příloha 5	Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně šířky záběru hlavního ostří (1/2)
Příloha 6	Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně šířky záběru hlavního ostří (2/2)
Příloha 7	Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně posuvu na zub (1/2)
Příloha 8	Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně posuvu na zub (2/2)

PŘÍLOHA 1

Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně šířky záběru hlavního ostří (1/2).



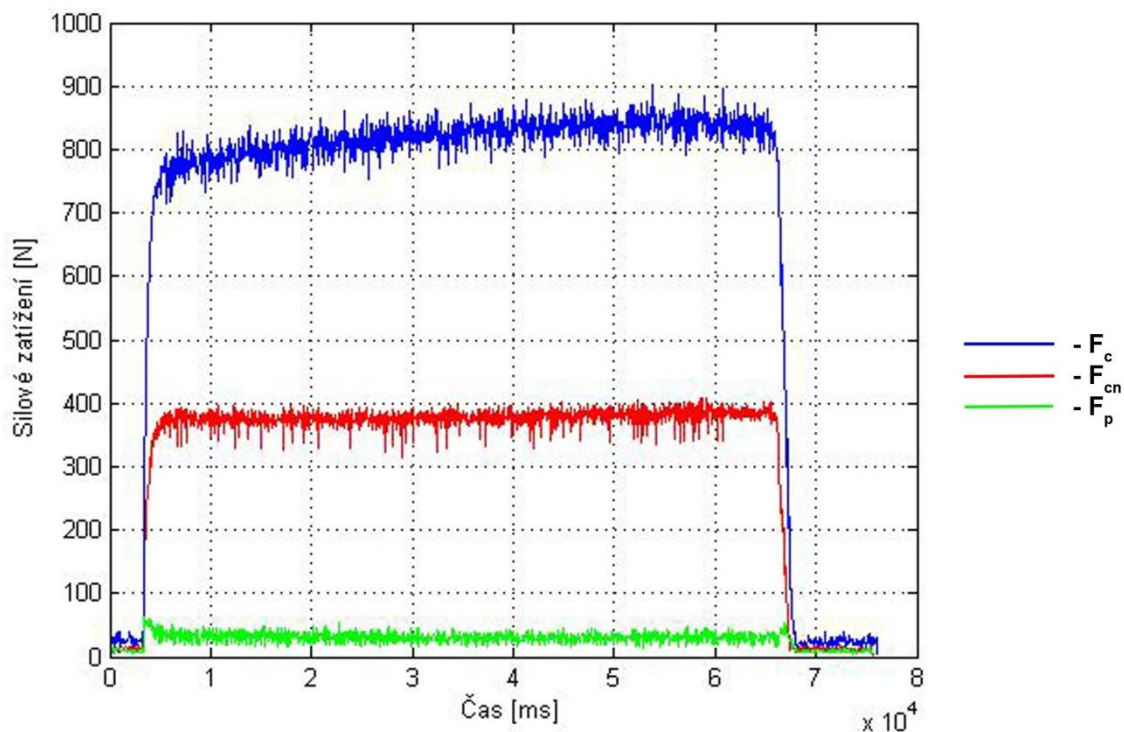
Průběh sil F_C , F_{Cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



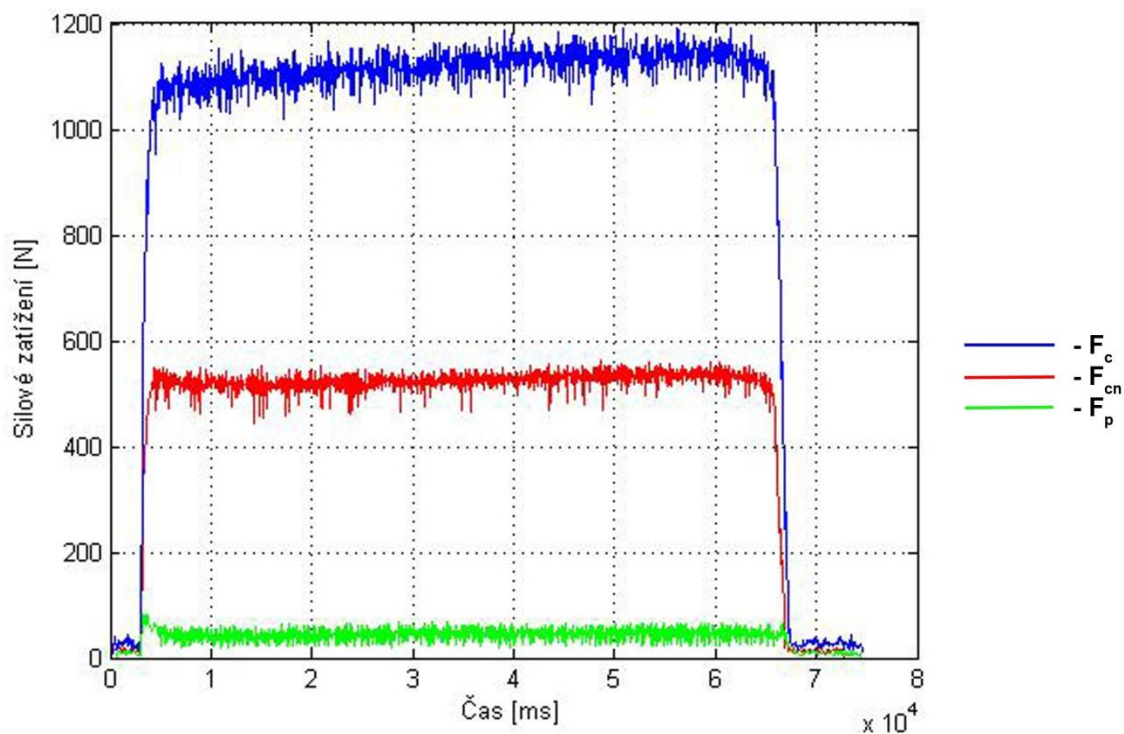
Průběh sil F_C , F_{Cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PŘÍLOHA 2

Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně šířky záběru hlavního ostří (2/2).



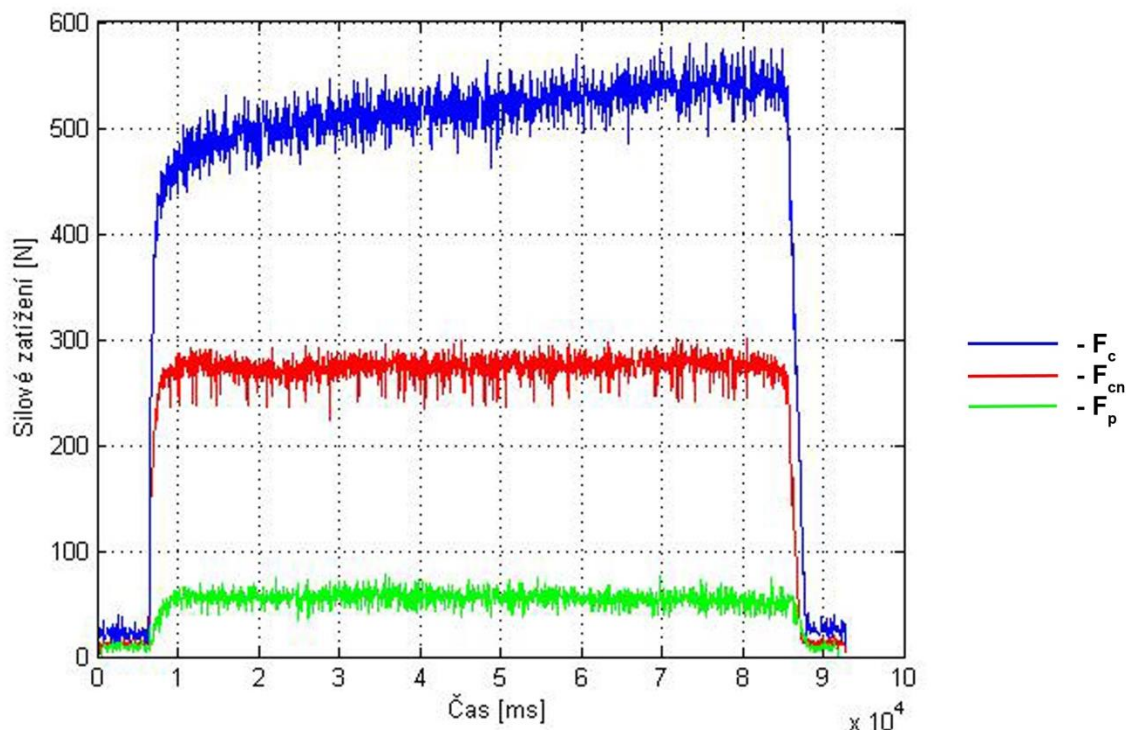
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 3 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



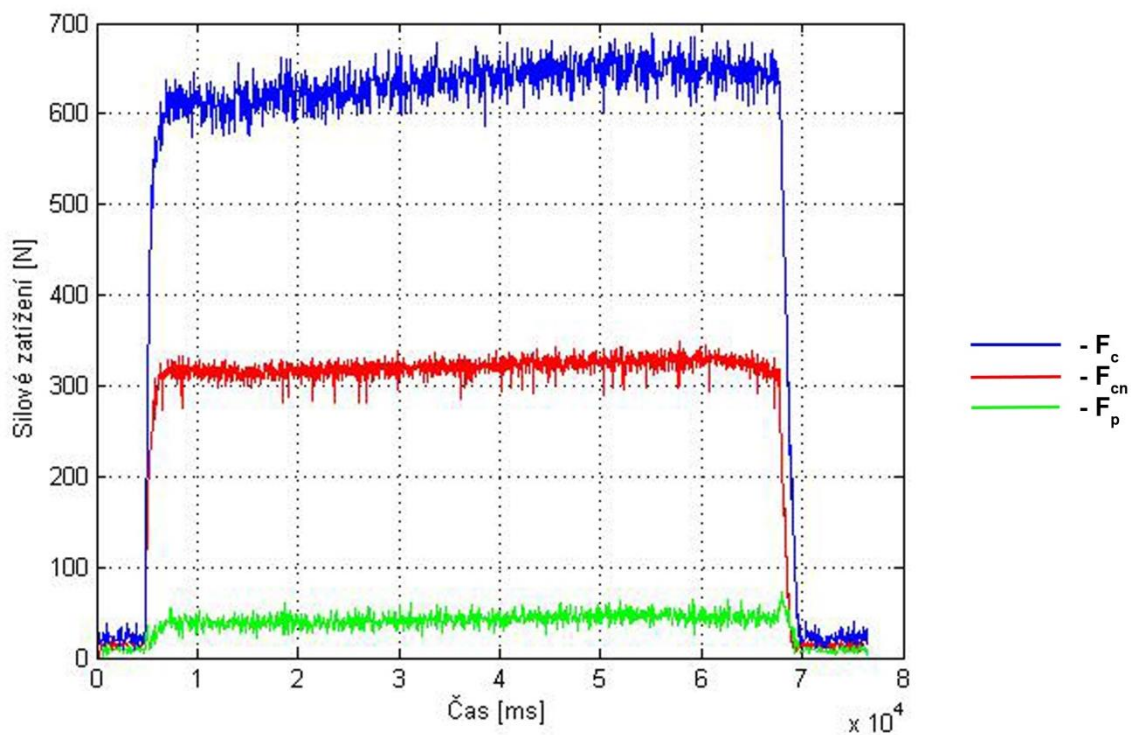
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 4 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PŘÍLOHA 3

Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně posuvu na zub (1/2).



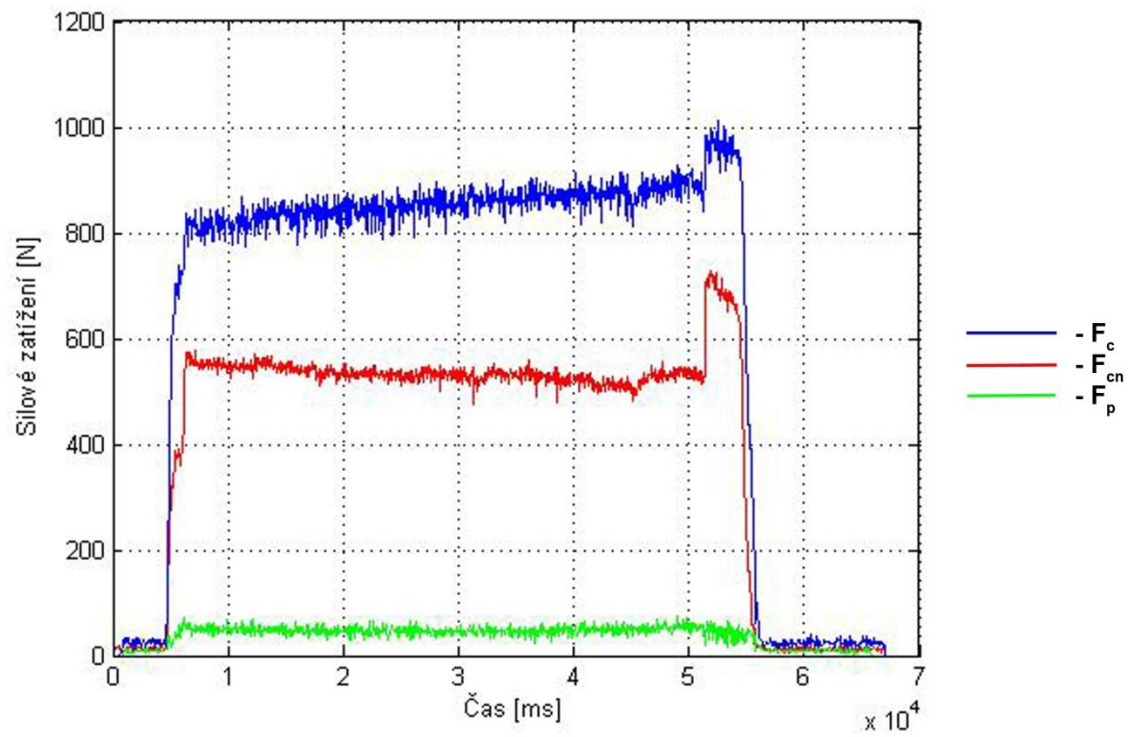
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_f = 80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PŘÍLOHA 4

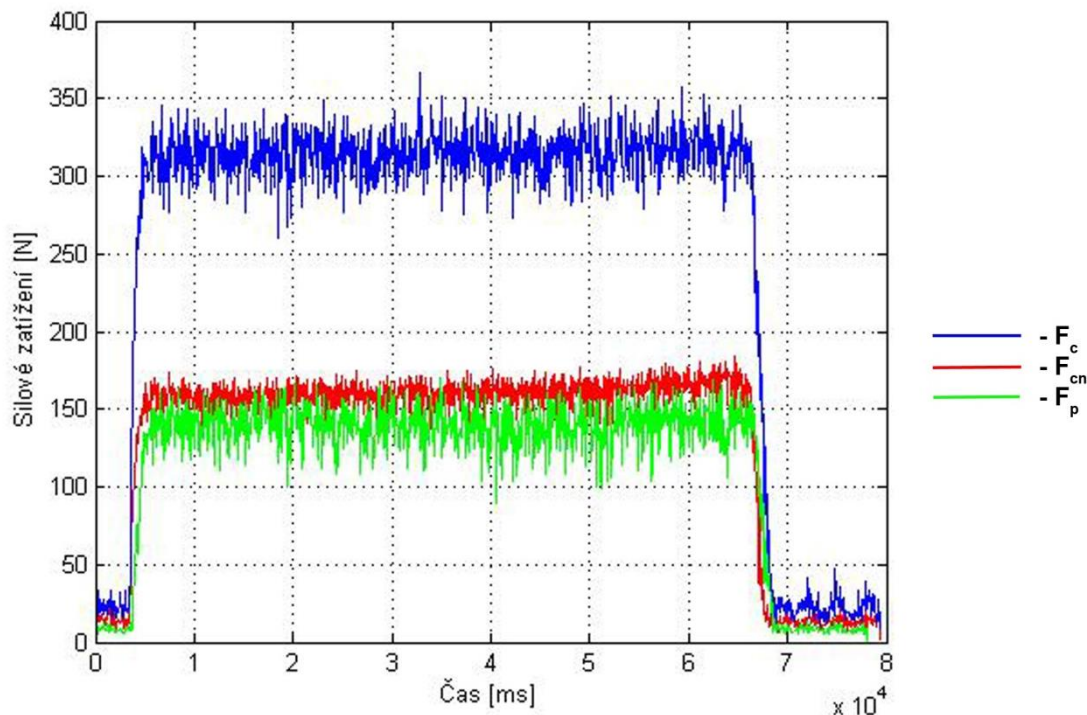
Grafy silového zatížení pro nepovlakovanou VBD při změně posuvu na zub (2/2).



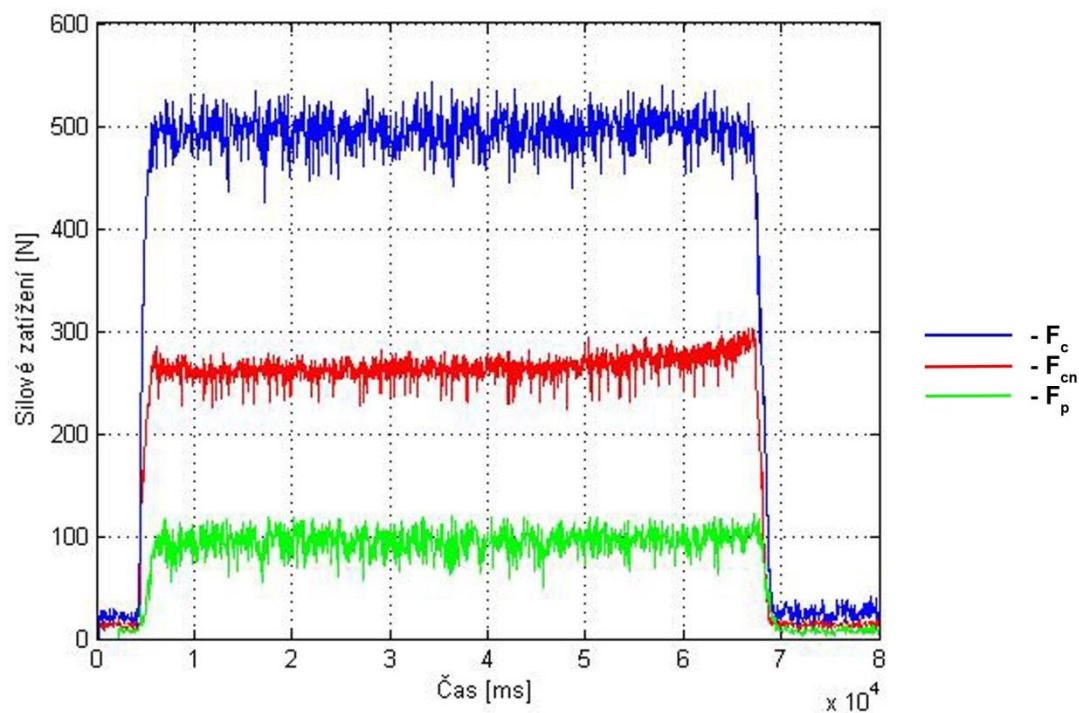
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování nepovlakovanou VBD za řezných podmínek:
 $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_f = 125 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PŘÍLOHA 5

Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně šířky záběru hlavního ostří (1/2).



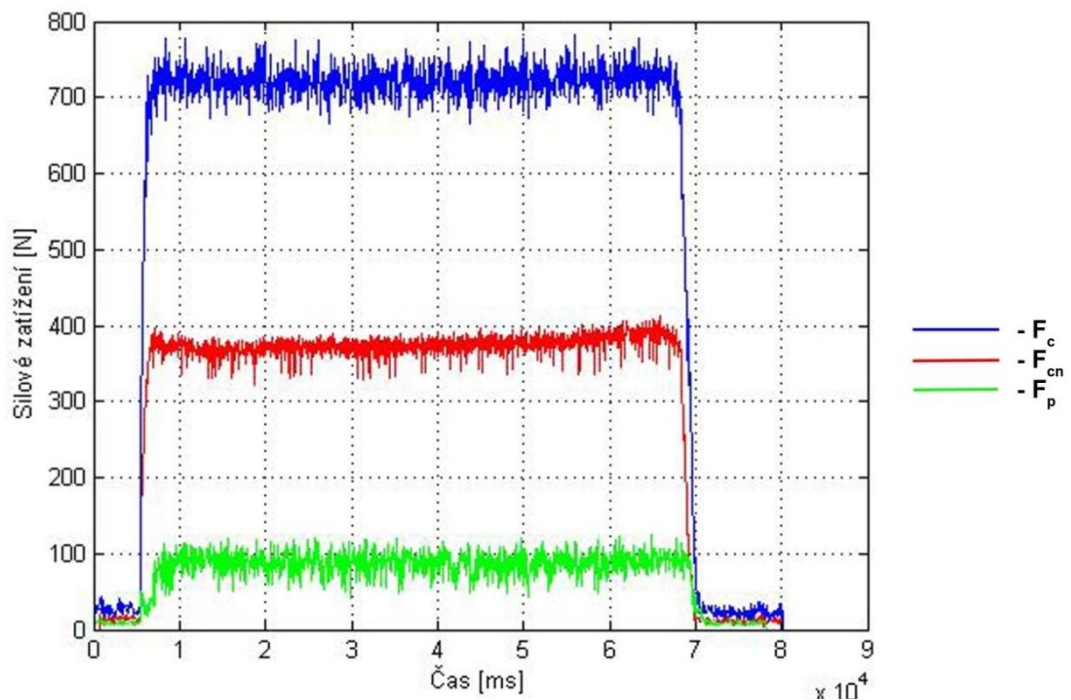
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



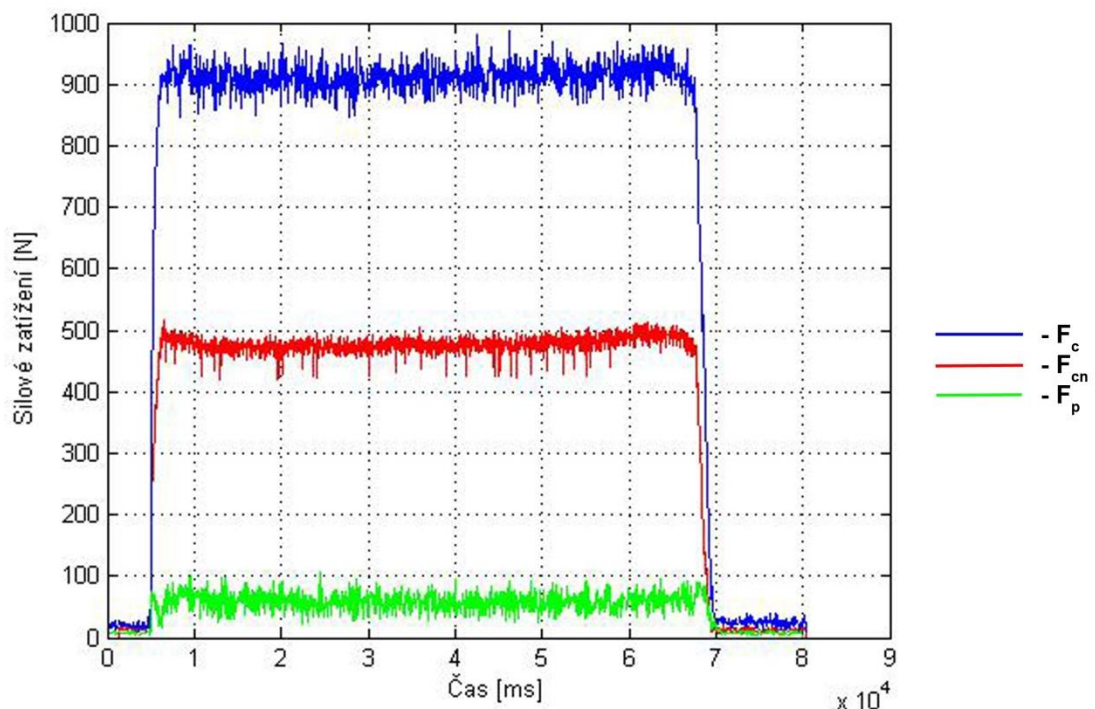
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PŘÍLOHA 6

Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně šířky záběru hlavního ostří (2/2).



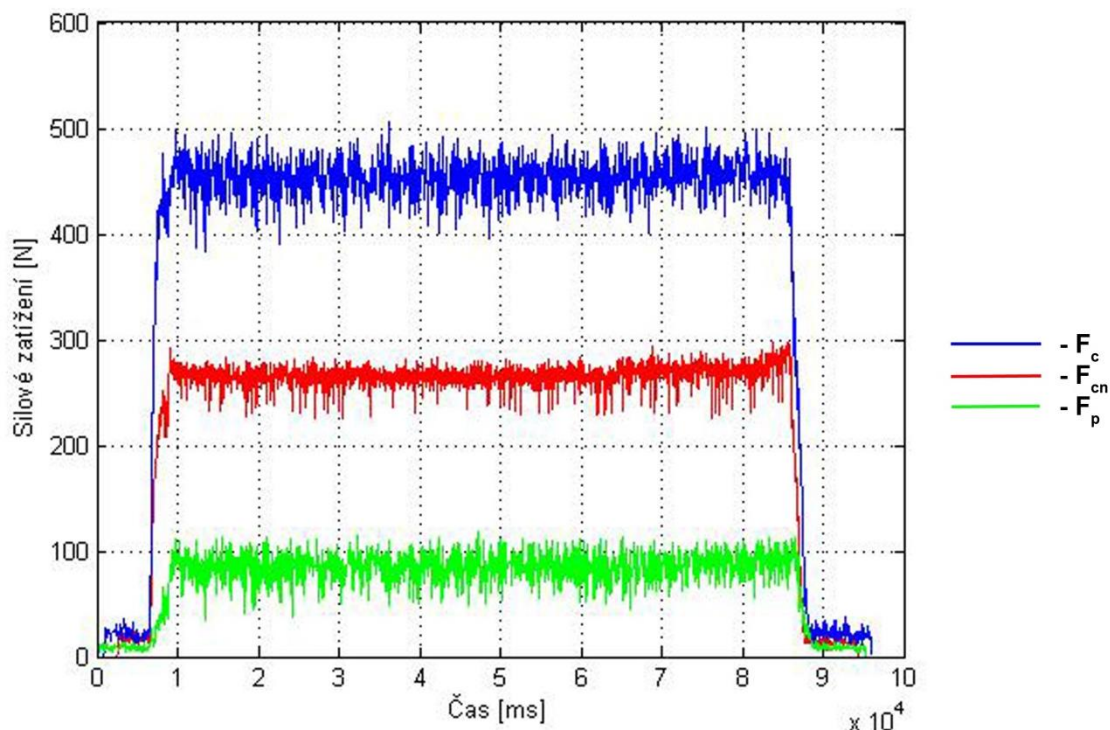
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 3 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



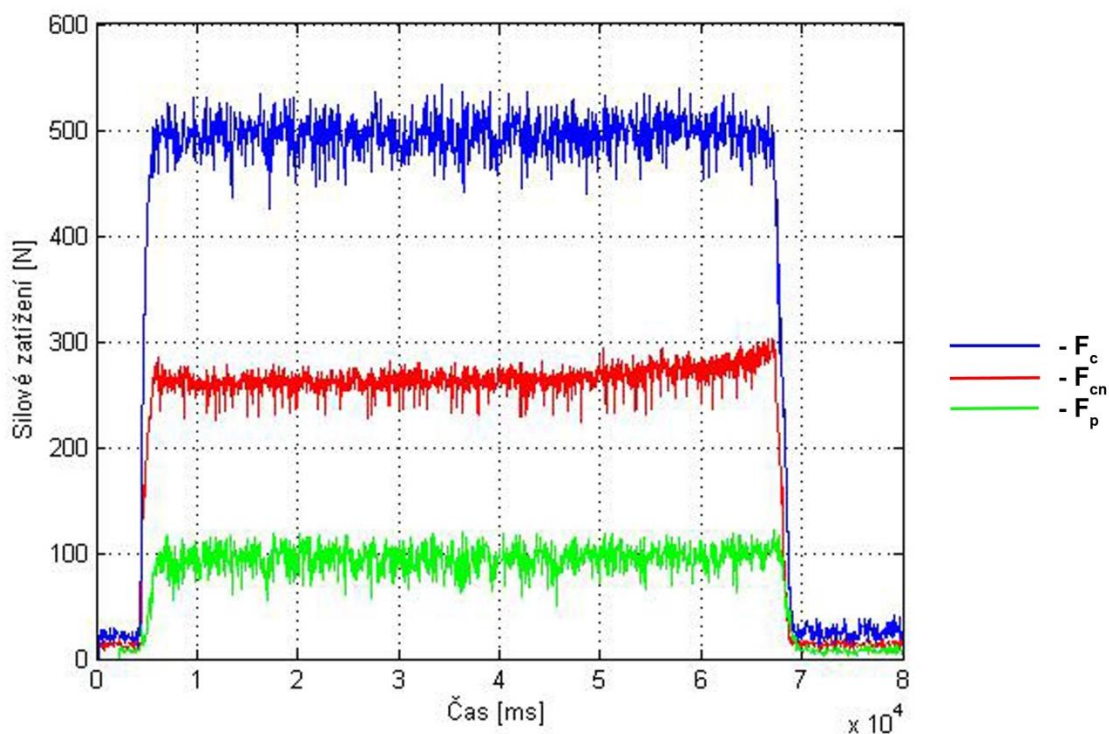
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 4 \text{ mm}$ a $v_f = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PŘÍLOHA 7

Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně posuvu na zub (1/2).



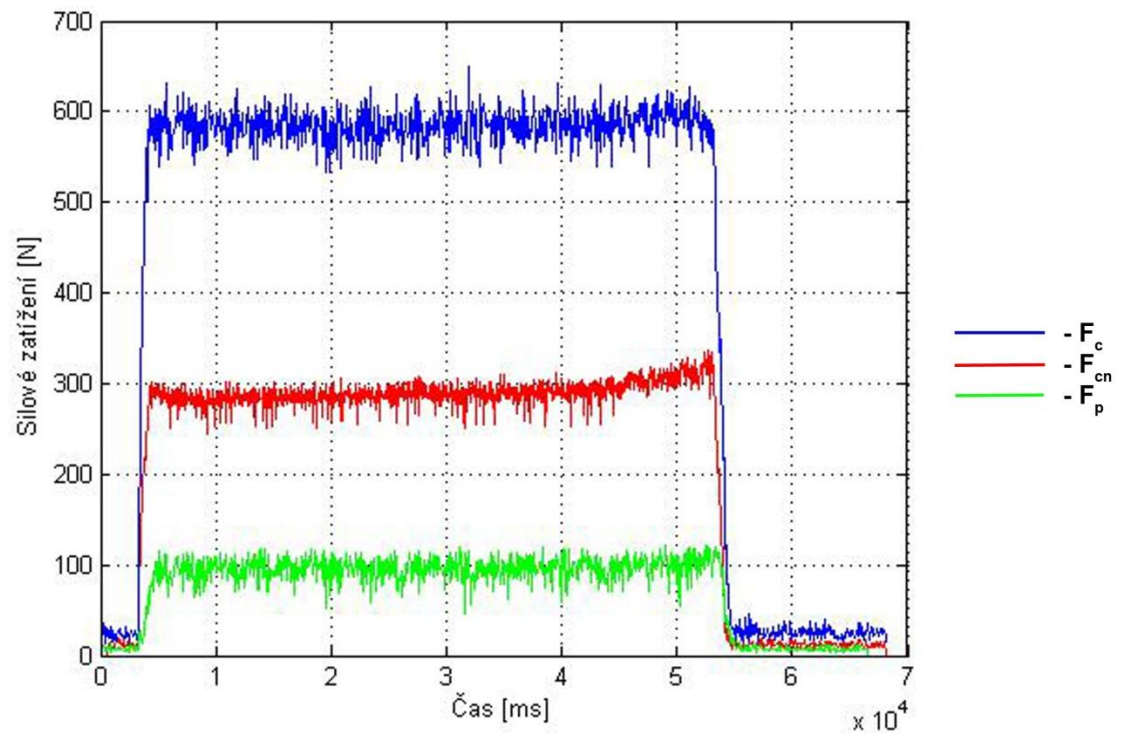
Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 2$ mm a $v_f = 80$ mm.min⁻¹



Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 2$ mm a $v_f = 100$ mm.min⁻¹

PŘÍLOHA 8

Grafy silového zatížení pro VBD s PVD povlakem TiAlN při změně posuvu na zub (2/2).



Průběh sil F_c , F_{cn} a F_p při čelním frézování VBD s PVD povlakem TiAlN za řezných podmínek:
 $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_f = 125 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$